

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**GEMİ MANEVRA MODELİ
VE
SAPMA AÇISININ KONTROLÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Abdullah TÜYSÜZ

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

HAZİRAN 2022

**GEMİ MANEVRA MODELİ
VE
SAPMA AÇISININ KONTROLÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Abdullah TÜYSÜZ
(504191102)**

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Leyla GÖREN SÜMER

HAZİRAN 2022

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 504191102 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Abdullah TÜYSÜZ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "GEMİ MANEVRA MODELİ VE SAPMA AÇISININ KONTROLÜ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Leyla GÖREN SÜMER**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Mehmet Turan SÖYLEMEZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Janset DAŞDEMİR
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi :
Savunma Tarihi :



Anneme, babama ve kardeşime





ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanması sürecinde yardımını esirgemeyen ve öğrencileriyle yalnızca üniversite öğrenimiyle sınırlı kalmayan pek kıymetli bilgi ve tecrübelerini paylaşan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Leyla GÖREN SÜMER'e teşekkürlerimi sunuyorum.

Haziran 2022

Abdullah TÜYSÜZ
(Kontrol Mühendisi)





İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
1. GİRİŞ	1
2. GEMİ MANEVRA DİNAMİK MODELİ	5
2.1 Kinematik Model.....	6
2.2 Dinamik Model	8
2.2.1 Katı cisim dinamik modeli	8
2.2.2 Dış kuvvet ve moment dinamik modeli	10
2.3 Mariner Gemi Modeli.....	10
3. MANEVRA MODELİNİN PARAMETRELERİNİN KESTİRİMİ	15
3.1 Model ve Kestirim Kabulleri.....	15
3.2 Kestirim Yöntemi	16
3.2.1 SAEKF yöntemi için sistem modeli.....	16
3.2.2 SAEKF yönteminin mariner manevra modeline uyarlanması	17
3.3 Kestirim Çalışmaları	19
3.3.1 Giriş işaretinin belirlenmesi	19
3.3.2 Model doğrulama testleri	20
3.3.3 Kestirim ve doğrulama sonuçları	22
3.3.3.1 Senaryo 1.....	24
3.3.3.2 Senaryo 2.....	28
3.3.3.3 Senaryo 3.....	32
3.3.3.4 Senaryo 4.....	36
4. MANEVRA MODELİ İÇİN KONTROLÖR TASARIMI	41
4.1 Kontrol Yöntemi	41
4.1.1 SDRE temelli tasarım yöntemi için sistem denklemleri	42
4.1.2 SDRE temelli tasarım yönteminin manevra modeline uyarlanması	43
4.2 Kontrol Testleri	44
4.2.1 Senaryo 1.....	45
4.2.2 Senaryo 2.....	46
4.2.3 Senaryo 3.....	47
4.2.4 Senaryo 4.....	48
4.2.5 Senaryo 5.....	49
4.2.6 Senaryo 6.....	50
5. SONUÇ	53
6. KAYNAKLAR	55
7. EKLER	59



KISALTMALAR

KF	: Kalman Filter
EKF	: Extended Kalman Filter
SAEKF	: State Augmented Extended Kalman Filter
SDRE	: State Dependent Riccati Equations
DOF	: Degree of Freedom





SEMBOLLER

u	: İleri hız
v	: Yanal hız
r	: Sapmanın açısal hızı
ψ	: Sapma açısı
L	: Gemi uzunluğu
u_0	: Seyir hızı
Δu	: Seyir hızı etrafındaki ileri hız değişimi
δ	: Dümen açısı
m	: Gemi kütlesi
I_z	: Gövde Z eksenine yönündeki dönme ataleti
x_G	: Ağırlık merkezinin gövde X eksenine üzerindeki konumu
M	: Gemi kütle ve eylemsizlik matrisi



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Öteleme eksen takımı simgeleri.	5
Çizelge 2.2 : Dönme eksen takımı simgeleri.	5
Çizelge 2.3 : Gemi model parametreleri.	10
Çizelge 2.4 : X kuvveti hidrodinamik katsayıları.	11
Çizelge 2.5 : Y kuvveti ve N momenti hidrodinamik katsayıları.	11
Çizelge 3.1 : Kestirilecek parametreler.	15
Çizelge 3.2 : SAEKF parametre matrislerinin boyutları.	17
Çizelge 3.3 : Senaryo 1 – Kestirim koşumu giriş işareti (kesintisiz uyarma mertebesi 50).	24
Çizelge 3.4 : Senaryo 1 - X kuvveti parametreleri kestirim sonuçları.	25
Çizelge 3.5 : Senaryo 1 - Y kuvveti ve N momenti parametreleri kestirim sonuçları.	25
Çizelge 3.6 : Senaryo 1 - Doğrulama koşumu giriş işareti.	26
Çizelge 3.7 : Senaryo 2 – Kestirim koşumu giriş işareti (kesintisiz uyarma mertebesi 87).	28
Çizelge 3.8 : Senaryo 2 - X kuvveti parametreleri kestirim sonuçları.	29
Çizelge 3.9 : Senaryo 2 - Y kuvveti ve N momenti parametreleri kestirim sonuçları.	29
Çizelge 3.10 : Senaryo 2 - Doğrulama koşumu giriş işareti.	30
Çizelge 3.11 : Senaryo 3 - Kestirim koşumu giriş işareti (kesintisiz uyarma mertebesi 165).	32
Çizelge 3.12 : Senaryo 3 - X kuvveti parametreleri kestirim sonuçları.	33
Çizelge 3.13 : Senaryo 3 - Y kuvveti ve N momenti parametreleri kestirim sonuçları.	33
Çizelge 3.14 : Senaryo 3 - Doğrulama koşumu giriş işareti.	34
Çizelge 3.15 : Senaryo 4 - Kestirim koşumu giriş işareti (kesintisiz uyarma mertebesi 69).	36
Çizelge 3.16 : Senaryo 4 - X kuvvet parametreleri kestirim sonuçları.	37
Çizelge 3.17 : Senaryo 4 - Y kuvveti ve N momenti parametreleri kestirim sonuçları.	37
Çizelge 3.18 : Senaryo 4 - Doğrulama koşumu giriş işareti.	38



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Gövde ve dünya eksen takımları.....	7
Şekil 3.1 : Senaryo 1 - Kestirim koşumu.....	24
Şekil 3.2 : Senaryo 1 - Hız kestirimi sonuçları.....	24
Şekil 3.3 : Senaryo 1 - Doğrulama koşumu.....	26
Şekil 3.4 : Senaryo 1 - Korelasyon analizi sonuçları.....	27
Şekil 3.5 : Senaryo 2 - Kestirim koşumu.....	28
Şekil 3.6 : Senaryo 2 - Doğrulama koşumu.....	30
Şekil 3.7 : Senaryo 2 - Korelasyon analiz sonuçları.....	31
Şekil 3.8 : Senaryo 3 - Kestirim koşumu.....	32
Şekil 3.9 : Senaryo 3 - Doğrulama koşumu.....	34
Şekil 3.10 : Senaryo 3 - Korelasyon analiz sonuçları.....	35
Şekil 3.11 : Senaryo 4 - Kestirim koşumu.....	36
Şekil 3.12 : Senaryo 4 : Doğrulama koşumu.....	38
Şekil 3.13 : Senaryo 4 - Korelasyon analiz sonuçları.....	39
Şekil 4.1 : Senaryo 1 – Sabit sapma açısı emri.....	45
Şekil 4.2 : Senaryo 2 – Sabit sapma açısı emri.....	46
Şekil 4.3 : Senaryo 3 – Sabit sapma açısı emri.....	47
Şekil 4.4 : Senaryo 4 – Farklı sapma açılarında basamak giriş emri.....	48
Şekil 4.5 : Senaryo 5 – Rota takibi, konum hedefleri.....	49
Şekil 4.6 : Senaryo 5 - Rota takibi, sapma ve dümen açıları.....	49
Şekil 4.7 : Senaryo 6 - Rota takibi, konum hedefleri.....	50
Şekil 4.8 : Senaryo 6 - Rota takibi, sapma ve dümen açıları.....	50



GEMİ MANEVRA MODELİ VE SAPMA AÇISININ KONTROLÜ

ÖZET

Gemi hareket kabiliyetini inceleyebilmek, hareket kontrol sistemini tasarlayabilmek ve gemiyi simülasyon ortamına taşıyabilmek amacıyla gemi dinamik hareket modelleri önerilmiştir. Önerilen modellere Abkowitz modeli, Nomoto model, Maneuvering Modelig Group modeli vb. örnek verilebilir. Abkowitz modeli bu modeller arasında yaygın kullanıma sahip bir modellerden birisidir. Abkowitz modeli gemiye etkiyen kuvvet ve momentlerin; gemi hareketine, pervane devrine ve dümen açısına bağlı çok terimli denklemler ile modellenmesine dayanır.

Geminin hareketlerini sergileyecek matematiksel model oluşturmak için simülasyondan bağımsız ve simülasyon tabanlı olmak üzere iki yöntem kullanılır. Simülasyondan bağımsız yöntemler; tam ölçekli gemilerden veri toplanması, ölçeklenmiş model gemileri ile model testlerinin yapılması veya farklı gemilere ait veri bankalarından faydalanılması şeklindedir. Simülasyondan bağımsız yöntemler, her geminin kendi yapısına uygun bir test altyapısı oluşturulması gerektiğinden maliyetli ve zaman alıcı yöntemlerdir.

Simülasyon tabanlı yöntemler ise sistem tabanlı ve hesaplamalı akışkan dinamiği tabanlı olmak üzere iki kısma ayrılabilir. CFD uygulamalarında doğruluğu yüksek sonuçlar elde etmek için çoğu zaman uzun hesaplama süresi gerektiren analizler yapılmaktadır. Sistem tabanlı yöntemlerden olan sistem tanıma teknikleri tekrarlı analizler gerektiren çalışmalar için CFD uygulamalarına göre daha elverişlidir. Kontrol mühendisliği alanında da sıkça kullanılan sistem tanıma teknikleri uygulama açısından model testlerine ve CFD uygulamalarına kıyasla erişim ve uygulama kolaylığına sahiptir.

Gemi dinamik hareket modellerinin çıkarılması için sistem tanıma deneylerinde çokça başvurulmaktadır. Bu alanda literatürde sıkça karşılaşılan sistem tanıma yöntemlerine örnek olarak en küçük kareler regresyonu (LS), genişletilmiş Kalman filtresi (EKF), en büyük olabilirlik kestirimi (MLE) örnek olarak verilebilir.

Gemi dinamik modeli kestirimi için gerçekleştirilen bir sistem tanıma deneyi akışı şu şekilde özetlenebilir: Yapılacak gemi model analizlerine uygun bir matematiksel model yapısı seçilir. Matematiksel modellere ait parametre setlerinden kestirimi yapılacak parametreler belirlenir. Sistem tanıma yöntemlerinden, model yapısına ve kestirilecek parametrelere uygun bir yöntemi seçilir. Tam ölçekli gemiden, ölçeklendirilmiş gemiden veya gerçekleştirilecek çalışmaya göre farklı bir alt sistemden kestirim çalışmalarına olanak sağlayacak ölçümler toplanır. Ölçümlerden uygun kısımlar, kestirim çalışması ve model doğrulama testleri için seçilir. Model doğrulama testleri ile sistem tanıma deneyi sonuçlandırılır. Kestirilen modelin

doğruluğu hedeflenen çalışma şartlarını karşılıyor ise gemi manevra analizi, kontrol sistem tasarımı vb. çalışma aşamalarına geçilebilir.

Tez kapsamında gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarında kullanılmak üzere, hem veri toplanacak gemi modeli hem de kestirim modeli olarak Abkowitz model yapısı tercih edilmiştir. Kestirilecek gemi modeli olarak “mariner” tipi gemi modeli kullanılmıştır. Kestirim çalışmalarında EKF temelli durum artırımı genişletilmiş kalman filtresi (SAEKF) yöntemi kullanılmıştır. EKF geliştirildiği zamandan bu yana sistem tanıma uygulamalarında sıkça kullanılan, farklı sistemler ve uygulamalar için temel alınıp özel yöntemler geliştirilen temel yöntemlerden biridir. SAEKF, EKF yöntemindeki durum vektörüne kestirilecek parametrelerin eklenmesiyle türetilmiş bir yöntemdir. Kestirim çalışmalarının ardından sistem tanıma deneylerinde doğrulama yöntemi olarak kullanılan bağımsızlık ve beyazlık testleri uygulanmıştır. Bu çalışmalar için farklı senaryolar oluşturulmuş, başarısız ve başarılı sonuçlar için incelemeler yapılmıştır.

Tezde kestirim çalışmalarının devamında gemi sapma açısı kontrolü için kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kontrol yöntemi olarak durumlara bağlı Riccati denklemleri (State dependent Riccati equations - SDRE) yöntemi seçilmiştir. Bu yöntem doğrusal sistemlerde optimal geri besleme kontrolcüsünü hesaplamak için kullanılan sabit değerli Riccati denklemi yöntemine dayanır. SDRE yönteminde durum uzay modeli, doğrusal olmayan sistemin durumları arasındaki ilişkiye bakılarak birden fazla şekilde tasarlanabilir. Mariner gemisi manevra modeli için SDRE yöntemine uygun bir durum uzayı modeli tasarlanmış ve kontrolör tasarımı bu model üzerinden gerçekleştirilmiştir. Kontrolör performansı, sapma açısı referansı ve rota takibi testleri kurgulanarak incelenmiştir.

SHIP MANOEUVRE MODEL AND HEADING ANGLE CONTROL

SUMMARY

Vessel dynamic models are proposed to research motion capabilities, to design motion control systems, and to integrate the vessel to simulation platform. Abkowitz model, Nomoto model, Maneuvering Modeling Group (MMG) model, vectorial model, and Lagrangian model can be given as example to these proposed models. Abkowitz is one of the widely-used model in these models. Abkowitz model is based on the proposal of forces and momentums that act on the vessel body are modeled by polynomial equations consists of vessel motion states, propeller spin, and rudder angle.

There are two basic different methods to design a mathematical model that simulates the vessel maneuver informations (linear ve lateral motion, tactical turning radius, overshoot). These methods are simulation-free and simulation-based methods.

The simulation-free methods can be summarized in three part as collecting data from full scaled vessels, performing model tests by using scaled vessels, and gathering datas from data banks of similar vesssels. Despite being reliable tests and having accurate results, high cost and long process time are needed for the model tests. Model tests are performed for every ship's own special structure; therefore, the usage area of the model tests are limited.

Also the system-based methods can be summarized in two as computational fluid dynamics (CFD) and system-based simulation methods. In CFD applications, computation time of process increases with demanded accuray rate. Because of that, to get highly accurate results executing numerous repetitive analyses increases the cost and time need. System identification method is one of the system-based methods. System identification method is depends on experimental data to develop a mathematical model of a dynamical system and the method has widely usage in control engineering. In comparision with the model tests and CFD applications, system idetification method is easier to use and has an easy accesseibility.

There are many methods that are used in the vessel dynamic model estimation are under the title of system identification. In example for these methods Least Square (LS), Extended Kalman Filter (EKF), Maximum Likelyhood Estimation (MLE), Recursive Prediction Error (RPE), Frequency Spectrum Analysis (FSA), Particle Swarm Optimization (PSO), Genetic Algorithm (GA), and Support Vector Regression (SVR) methods can be given.

An estimation process of vessel dynamic model can be summarized as follows:

- 1- Between Abkowitz, MMG, Nomoto, vectorial, and Lagrangian etc. models, the convenient one is chosen for the for the purpose of studies.
- 2- To estimate parameters of the chosen model by using system identification methods, data collects from full scaled vessels, scaled vessels or another subsystem related to the study subject within possibility.
- 3- For estimation and verification process, the collected data is divided into parts.
- 4- After the estimation process is completed succesfully, the estimation model that is derived as a result of estimation process is used for verification process.
- 5- If the accuracy of the estimation model is enough to represent vessel dynamics for desired working conditions, control system desing etc. studies can be applied on the estimated model.

In this thesis:

EKF based SAEKF method was used for estimation and SDRE method was chosen for controlor design. There are many examples of EKF is used in system identification experiments for vessels. EKF method is developed from Kalman Filter for the systems that are nonlinear or the measurements that has nonlinear relationship with the system states. By adding parameters that are going to be estimated into EKF state vector and rearranging state matrix, SAEKF algorithm structure is obtained. SDRE is a newly developed method in control community. SDRE method has a flexible design and easily applicable structure. Thanks to that, in the last 20 years, SDRE took its place among the well-known methods in the literature.

SDRE method depends on the idea called extended linearization. In extended linearization, nonlinear systems are modeled in state-space form by taking model states as constant coefficients. This form is named as “State Dependent Coefficient (SDC)”. Nonlinear effects that may be lost in linearization process for creating state-space form of an system, can be saved in the model by using SDC form. SDRE based control method is developed for infinite horizon quadratic optimization problems of nonlinear systems. Even though the method is not developed for time limited problems, it can give successful result on the systems that has long settling time. Due to being a Riccati equation based method, SDRE has numerical solution and thus the method can be applied to real time control applications.

The studies were achieved in this thesis can be summarized as follows:

Firstly, a vessel maneuver dynamic model built to be able to do studies in simulation environment. The vessel model was taken from Fossen’s “Guidance and Control of Ocean Vehicles” book. The taken model is a mariner type vessel maneuver model. In the thesis, all estimation and control studies were achieved by using that model. After building the maneuver dynamic model, assumptions about known and unknown model parameters were made and the parameters to be estimated were determined. The unknown parameters to be estimated are all of the damping and rudder hydrodynamic parameters in X - Y forces and N moment equations of motions of the model. To estimate unknown parameters SAEKF method was chosen. SAEKF system equations were customized for the mariner maneuver model and SAEKF state space model was obtained.

Secondly, linear and angular velocity data that belongs the body axis frame of the vessel were collected from simulation runs of the mariner model. Measurements were derived by adding white noises with a determined value of variance to real value of the velocities. Four scenarios were created for the simulation runs with specified rudder inputs. The effects of inputs to estimation were analyzed in the verification part.

After the estimation studies were done, an estimation model were created by using estimated hydrodynamic parameters. For each estimation scenario, one verification scenario were created. The rudder inputs that were used verification scenarios were differentiated from estimation scenarios' rudder inputs. Verification runs were done for real model (mariner model) and estimated model. Whiteness and independency test were achieved with the measurement data collected from verification runs. Estimation and verification runs' results were shared. Between four scenarios, one of the successful estimation model were chosen to use in controller design part.

Thirdly, in the controller desing part, heading angle control studies were carried out by designing SDRE controller. SDRE system model were customized for mariner maneuver dynamic model. A proper value of weight coefficient of the control input " R " was determined. While determining, limitations of rudder of the model were considered.

Fourthly, measurements that contains white noise are filtered by a Kalman filter and given to controller as state feedbacks to complete closed loop system. The Kalman filter derived by placing values of the estimated parameters in the SAEKF model.

Lastly, heading angle command and course tracking scenarios were created to analyze the performance of the SDRE controller. The mariner vessel tracked referances without overshoot and reached to referances angle at steady-states for the two scenario types too.



1. GİRİŞ

Seyir halindeki bir gemi; büyük ölçüde doğrusal olmayan, uzun ölü zamanlı ve zamanla değişen bir dinamiğe sahiptir [1].

Gemi manevra kabiliyetleri üzerinde araştırmalar yapılabilmesi, gemi hareket kontrol sisteminin tasarımı ve gemi yönetimi simülatörlerinin geliştirilebilmesi için gemi hareketini tam olarak tanımlayabilecek manevra modelleri geliştirilmelidir [2].

Belirtilen çalışmaların gerçekleştirilebilmesi için birçok matematiksel suüstü aracı manevra modelleri önerilmiştir. Önerilen matematiksel modellere; Abkowitz modeli [3], Maneuvering Modeling Group (MMG) modeli [4], Nomoto modeli [5], vektörel model [6] ve 4 serbestlik dereceli Lagrange yaklaşımı doğrusal olmayan gemi modeli [7] örnek gösterilebilir. Bu model yapılarından en yaygın kullanıma sahip olanlardan biri Abkowitz modelidir. Abkowitz, gemi hidrodinamik kuvvet ve momentlerinin; manevra hareketine, pervane devrine ve dümen açısına bağlı çok terimli değişkenler içeren denklemlerin uygun koşullar etrafındaki Taylor serisi açılımları ile tanımlanabileceği öngörüsünde bulunmuştur. Bu öngöründe hidrodinamik katsayılar, hidrodinamik denklemlerin ilgili değişkenlere göre kısmi türevleri alınarak elde edilir.

Genel olarak, gemiye ait manevra bilgilerini (ileri ve yanal yönlü yer değiştirme, taktik yarıçapı, aşım) elde etmede kullanılacak bir matematiksel model oluşturmak için simülasyondan bağımsız veya simülasyon tabanlı olmak üzere iki yöntem kullanılır.

Simülasyondan bağımsız yöntemlerde manevra bilgileri; farklı gemilere ait veriler ile oluşturulmuş veri bankalarından, tam boyutlu gemi seyirlerinden veya ölçeklendirilmiş gemilerin serbest devinimli model testlerinden elde edilebilir [8]. Gemi model testleri güvenilir ve isabetli sonuçlar vermesine karşın, her geminin kendi yapısına uygun gerçekleştirilen testler olduğundan yüksek maliyet gerektiren ve gerçekleştirilmesi zaman alan testlerdir. Bu sebeple uygulama alanları kısıtlıdır.

Simülasyon tabanlı yöntemler ise sistem tabanlı ve hesaplamalı akışkan dinamiği (Computational fluid dynamics, CFD) tabanlı manevra simülasyonları olarak iki kısma

ayrılabilir [8]. CFD uygulamalarında hesaplama süresi yapılacak analizin doğruluk oranına bağlı olarak arttığından ve hesaplamalar uzun zaman aldığından çok sayıda tekrarlı analizler gerçekleştirmek maliyeti artırmaktadır. Sistem tabanlı yöntemlerden olan sistem tanıma teknikleri, dinamik sistemler için deneysel verilerden matematiksel model geliştirmek amacıyla geliştirilmiş olan ve kontrol mühendisliğinde de sıkça kullanılan yöntemlerdir. Sistem tanıma teknikleri, model testlerine ve CFD uygulamalarına oranla erişim ve uygulama açısından daha kolaydır.

Gemi sistemine ait bilinmeyenlerin kestirimi için sistem tanımlama deneylerinde kullanılan yöntemlere örnek olarak; en küçük kareler (Least Square, LS) regresyonu [9], genişletilmiş Kalman filtresi (Extended Kalman filter, EKF) [10, 11], en büyük olabilirlik kestirimi (Maximum likelihood estimation, MLE) [12], yinelemeli tahmin hatası (Recursive prediction error, RPE) [13], frekans spektrum analizi (Frequency spectrum analysis, FSA) yöntemi [14], parçacık sürü optimizasyonu (Particle swarm optimization, PSO) [15], genetik algoritma (Genetic algorithm, GA) [16] ve destek vektör regresyonu (Support vector regression, SVR) [17] yöntemleri verilebilir.

Tez kapsamında gemi sistem tanıma deneylerinde yaygın kullanıma sahip olan EKF'yi temel alan bir sistem tanıma yöntemi kullanılmıştır. EKF yöntemi geliştirildiği zamandan bu yana gemi modelleri için sistem tanıma uygulamalarında sıkça kullanılmıştır. Örneğin Perera ve arkadaşları, yönelim hareketi için düzenlenmiş Nomoto modeline ait değişkenleri EKF kullanarak kestirmiştir [19] [20]. Fossen, gemi dinamik konumlandırma modeli değişkenlerini kestirmek için iki paralel ölçüm serisini kullanabilen çevrimdışı çalışan bir paralel EKF algoritması önermiştir [21]. Abkowitz ve Hwang çalışmalarında “durum artırımı genişletilmiş Kalman filtresi” (State augmented extended Kalman filter, SAEKF) kullanarak orijinal durum vektörüne hidrodinamik katsayı değişkenlerini dahil ederek sistem tanıma çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir [3] [18]. Serbest devinimli model testleri ile gerçekleştirilen kestirim çalışmalarında da EKF algoritması kullanılmıştır [22] [23].

Hidrodinamik katsayı kestirimi için yapılacak bir sistem tanıma deneyi akışı şu şekilde özetlenebilir: Abkowitz, MMG, Nomoto, vektörel ve Lagrange vb. matematiksel gemi modellerinden uygun görülen bir model yapısı tercih edilir. Seçilen matematiksel modelin parametrelerinin sistem tanıma deneyleri yardımı ile

kestirilebilmesi için imkanlara bağılı olarak tam ölçekli gemiden, ölçeklendirilmiş gemiden veya gerçekleştirilecek çalışmaya göre farklı bir alt sistemden veri toplanır. Toplanan verilerden kestirim ve doğrulama için uygun kısımlar seçilir. Kestirimin gerçekleştirilmesinin ardından ortaya çıkarılan modelin doğruluğı test edilir. Kestirilen modelin doğruluğı hedeflenen çalışma şartlarını karşılıyor ise gemi manevra analizi, kontrol sistem tasarımı vb. çalışma aşamalarına geçilebilir.

Bu tezde kestirim çalışmalarının devamında kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kontrol yöntemi olarak “durumlara bağılı Riccati denklemleri” (State dependent Riccati equations) yöntemi seçilmiştir. SDRE yöntemi ilk olarak Pearson tarafından önerilmiştir [25]. Bu yöntem doğrusal sistemlerde sub-optimal geri besleme kontrolörünü hesaplamak için kullanılan sabit değerli Riccati denkleminin çözümüne dayanır. SDRE bu yaklaşımı ile doğrusal olmayan durumlar için Riccati denklem çözümlemesini mümkün kılar. Doğrusal olmayan sistem, durum uzay modelinde tekil olmayan matrisler biçimlerinde tanımlanır. Bu yöntemde model doğrusallaştırılmasına gidilmediğinden kontrol performansını artırabilecek doğrusal olmayan etkiler de işleme alınır. Bu yöntemin diğere doğrusal olmayan kontrol yöntemlerine göre bir avantajı, doğrusal problemler için kullanılan Riccati denklemleri gibi sayısal olarak kolay bir çözüm sunmasıdır. Gemi hareket kontrolü üzerine yapılan çalışmalara Çimen’in çalışması örnek gösterilebilir [26]. Çimen, çalışmasında 190.000 ton ESSO tanker gemisi için klasik yöntemlerin dışında doğrusal olmayan bir matematiksel model önerisinde bulunmuş ve bu modele SDRE kontrol yöntemini uygulamıştır.

Tez kapsamında gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarında kullanılmak üzere, hem veri toplanacak gemi modeli hem de kestirim modeli olarak Abkowitz model yapısı tercih edilmiştir. Kestirilecek gemi modeli olarak “mariner” tipi gemi modeli kullanılmıştır [24]. Kestirim yöntemi olarak SAEKF seçilmiştir. Mariner gemi modelinin hidrodinamik katsayılarının kestirimine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Kestirilen modele korelasyon analizleri uygulanmış ve kestirim doğruluğı incelenmiştir. Tezin devamında ise kestirilen model ile kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiş ve kontrolör performansı incelenmiştir. Kontrol yöntemi olarak duruma bağılı Riccati denklemleri (State dependent Riccati equation, SDRE) yöntemi kullanılmıştır.



2. GEMİ MANEVRA DİNAMİK MODELİ

Uzayda bir cismin konumu ve yönü 6 koordinat ile ifade edilmektedir. Bunlardan 3'ü öteleme, 3'ü dönme hareketleri içindir. Bulunduğu ortamdan bağımsız olarak cismin hareketinin bu koordinat takımları temel alınarak ifadesi mümkündür.

Temel alınan bu 6 eksenli koordinat takımına bağlı kalınarak, kullanım sahasına (havacılık, denizcilik, karacılık) bağlı olarak konum-yön, kuvvet-moment, hız ifadelerinde ifade ve simgeleme farklılıkları görülebilir. Deniz araçları için kullanılan genel simgeleme yapısı ve Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Öteleme eksen takımı simgeleri.

Hareket Eksen Takımı	Hareket Ekseni	Kuvvet	Çizgisel hız	Konum
Öteleme	X eksenli yönlü (ileri öteleme)	X	u	x
	Y eksenli yönlü (yanal öteleme)	Y	v	y
	Z eksenli yönlü (dikey öteleme)	Z	r	z

Çizelge 2.2 : Dönme eksen takımı simgeleri.

Hareket Eksen Takımı	Hareket Ekseni	Moment	Açısal hız	Euler açısı
Dönme	X eksenli etrafında (yalpalama)	K	p	ψ
	Y eksenli etrafında (yunuslama)	M	q	θ
	Z eksenli etrafında (sapma)	N	r	φ

Gemi modelleri çıkarılırken kullanım amacına bağı olarak, “denizcilik” ve “manevra” modeli adları altında serbestlik derecesinde indirgemeye gidilebilmektedir. Denizcilik modelleri, ortam şartlarının gemiye etkisinin incelenmesine yönelik olup, daha çok dikey öteleme, yalpalama ve yunuslama hareketleri ile ilgili modellerdir. Manevra modelleri ise gemi seyir hareketlerinin incelenmesine yöneliktir ve ileri yönlü öteleme, yanal yönlü öteleme ve sapma hareketleri ile ilgilidir. Gemi hareket kontrolü çalışmalarında da genellikle kullanılan modeller 3 serbestlik derecesine (3 DOF) indirgenmiş manevra modelleridir. Bu sebeple tez kapsamında kullanılmak üzere 3 DOF manevra modeli yapısı seçilmiştir.

2.1 Kinematik Model

Cismin sahip olduğu 6 eksenli hareket kabiliyetinin, cismin bulunduğu ortamdaki iz düşümünü veya ortamdaki kaynaklı etkilerin cisim üzerindeki izdüşümünü incelemek amacıyla kinematik modeller oluşturulur. Kinematik modeller cisim ile ortam arasındaki hareketin dönüşümünü sergileyen matematiksel ifadelerdir. Bu dönüşüm cisim ve ortam üzerinde belirlenen referans eksenler etrafında gerçekleştirilir. Referans eksenleri içeren eksen takımları, cisim ile ortam ilişkisine göre belirlenir.

Gemi ile bulunduğu ortam arasındaki hareket dönüşümünü ifade edecek kinematik modeli ortaya koymak amacıyla; cismin hareketli olan gemi, ortamın sabit olan dünya olduğu kabulü yapılabilir. Gemi üzerindeki eksen takımı gövde eksen takımı şeklinde, dünya üzerindeki eksen takımı ise dünya eksen takımı şeklinde ifade edilebilir.

Gövde eksen takımı, gemi üzerinde sabit ve gemi ile beraber dünya üzerinde hareketli; dünya eksen takımı ise belirlenen bir referans noktası üzerinde sabittir. Referans noktası dünyanın merkezi veya üzerinde belirlenen yerel bir nokta olabilir.

Gemi modeli oluşturulurken kullanılacak olan gemi ve dünya üzerindeki eksen takımları arasındaki ilişki Şekil 2.1’de görülmektedir.

$$T = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + R_x \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + R_x R_y \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}$$

Manevra modeli için 3 DOF dönüşüm matrisi Denklem 2.4 ile verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_e \\ \dot{Y}_e \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

2.2 Dinamik Model

Dinamik modeller, gerçek dünyada bulunan bir sistemin dinamik davranışını modelleyen matematiksel denklemlerdir. Seçilen sistem ve ortam özelinde matematiksel model elde edilirken hesaplamaları kolaylaştırmak, modelin incelenen davranışında düşük etkileri modele almamak gibi amaçlarla kabuller yapılmaktadır.

Gemi dinamik modeli oluşturulurken geminin katı cisim (sıkıştırılamaz, eş kütle dağılımlı) özelliğinde olduğu kabulü yapılabilir. Katı cisimlerin dinamik modellerini çıkarırken modelleme iki parçaya ayrılarak gerçekleştirilebilir. Birincisi sistemin kendi sahip olduğu momentumun ifadesi, ikincisi de sistemin dış ortam ile arasında gerçekleşen etkileşimlerdir.

2.2.1 Katı cisim dinamik modeli

Geminin sahip olduğu momentumun modellenmesinde Euler'in birinci ve ikinci hareket yasalarından yararalanılır. Bu yasalar doğrultusunda işlemler yapılırken geminin çizgisel ve açısal momentum değişiminin, gövde üstüne dış etkiler tarafından uygulanan kuvvetlerin ve momentlerin toplamının sonucu olduğu kabul edilir. Newton'un ikinci hareket yasasının işleme alınmasıyla momentum değişimi ile cismin hareket dinamiği arasındaki ilişki kurulmuş olur. Gövde eksen takımı merkezinin ağırlık merkezi ile çakışık olduğu durum için Newton-Euler hareket yasası Denklem 2.5 ile verilmiştir.

$$\sum \vec{F}_G = \dot{\vec{H}}_G$$

$$\sum \vec{\tau}_G = \dot{\vec{L}}_G \quad (2.5)$$

$$\begin{bmatrix} \vec{F}_G \\ \vec{\tau}_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I_G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{a}_G \\ \vec{\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \vec{\omega} \times (m\vec{v}_G) & 0 \\ 0 & \vec{\omega} \times (I_G\vec{\omega}) \end{bmatrix}$$

Denklem 2.5'te verilen denklemlerde; üst indis $\vec{}$ vektörleri, alt indis G ağırlık merkezi merkezli ifadeleri, F kuvveti, H çizgisel momenti, m kütle, v çizgisel hızı, a çizgisel ivmeyi; τ torku, L açısal momentumu, I atalet momentini, ω açısal hızı, α açısal ivmeyi ifade etmektedir.

Gemi modellerinde gövde eksen merkezi ile ağırlık merkezi çakışık olmayabilirler. Gövde eksen takımı merkezinin ağırlık merkezi olmadığı durum için Newton-Euler hareket yasası Denklem 2.6 ile verilmiştir [24].

$$\begin{aligned} \sum \vec{F}_C &= m(\vec{a}_C + \vec{\omega} \times \vec{v}_C + \vec{\alpha} \times \vec{r}_G + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}_G)) \\ \sum \vec{\tau}_C &= I_C \vec{\alpha} + \vec{\omega} \times (I_C \vec{\omega}) + m \vec{r}_G \times (\vec{a}_C + \vec{\omega} \times \vec{v}_C) \end{aligned} \quad (2.6)$$

Denklem 2.6'da alt indis C gövde eksen takımı merkezli ifadeleri, gövde eksen takım merkezine göre olan r_G ağırlık merkezi konumunu belirtmektedir.

Gövde eksen takımı merkezinin ağırlık merkezinden farklı seçildiği durumdaki, gemi manevra modeli yapısı için katı cisim dinamik modeli Denklem 2.7 ile verilmiştir.

$$\begin{aligned} m(\dot{u} - vr - x_G r^2 - y_G \dot{r}) &= X \\ m(\dot{v} + ur - y_G r^2 + x_G \dot{r}) &= Y \\ I_z \dot{r} + m(x_G(\dot{v} + ur) - y_G(\dot{u} - vr)) &= N \end{aligned} \quad (2.7)$$

Denklem 2.7'de verilen eşitlikte; X ve Y gövdeye etkiyen dış kuvvetleri, N gövdeye etkiyen dış momenti, x_G ve y_G ağırlık merkezinin gövde üstündeki konumunu, I_z z eksenini etrafındaki dönme ataletini, \dot{u} - \dot{v} - \dot{r} simgeleri de gövde eksenindeki çizgisel hız değişimlerini ve açısal hız değişimini yani ivmeleri ifade etmektedir. Eşitliğin sol tarafında katı cisim gövdesinin momentum değişimi, sağ tarafında ise cismin gövdesi üzerine etkiyen dış etkilere ait kuvvet ve moment toplamları yer almaktadır.

2.2.2 Dış kuvvet ve moment dinamik modeli

Temel bir gemi modelinde dış kuvvet ve momentler; hidrodinamik kuvvetlerin, çevresel kuvvetlerin ve itici kuvvetlerin toplamı olarak ifade edilebilir. Hidrodinamik kuvvetler; gövdeyi çevreleyen sıvının ek kütle etkisi, hidrodinamik sönümlenmeler ve dengeleyici kuvvetlerin toplamıdır. Çevresel etkiler; akıntı, dalga ve rüzgar etkilerini içermektedir. İtici kuvvetler ise pervane ve dümen kontrol yüzeylerinin etkilerini içermektedir. Dış kuvvet modeli Denklem 2.8 ile verilmiştir.

$$F = M_{ek\ kütle}\dot{x} + D_l x + D_{nl} + g + T \quad (2.8)$$

Denklem 2.8’de, F dış kuvvet ve moment toplamını, x ve \dot{x} gemi hızını ve ivmesini, $M_{ek\ kütle}$ ek kütle matrisini, D_l doğrusal sönümlenme katsayılarını, D_{nl} doğrusal olmayan sönümlenme katsayılarının etkilerini, g dengeleyici kuvvetleri ve T itici kuvvetleri ifade etmektedir. Denklem 2.8’deki ifadelerin mariner gemi modeli özelindeki açıklamalarına Bölüm 2.3’te yer verilmiştir.

2.3 Mariner Gemi Modeli

Mariner gemisi model parametreleri Çizelge 2.3’te, manevra modeli hidrodinamik katsayıları Çizelge 2.4 ile Çizelge 2.5’te, gemi manevra dinamik modeli Denklem 2.9-2.12’de verilmiştir.

Çizelge 2.3 : Gemi model parametreleri.

Katsayı Sembolü	Katsayı Değeri	Açıklaması
L	160.93	Gemi uzunluğu (metre)
u_0	7.716	Seyir hızı (metre/saniye)
m	$798 \cdot 10^{-5}$	Gemi kütlesi (birimsiz)
I_z	$39.2 \cdot 10^{-5}$	Gövde Z eksenini yönündeki dönme ataleti (birimsiz)
x_G	-0.023	Ağırlık merkezinin gövde eksen takımına göre X eksenini üzerindeki konumu (birimsiz)

Çizelge 2.4 : X kuvveti hidrodinamik katsayıları.

Katsayı sembolü	Katsayı değeri
$X_{\dot{u}}$	-42×10^{-5}
X_u	-184×10^{-5}
X_{uu}	-110×10^{-5}
X_{uuu}	-215×10^{-5}
X_{vv}	-899×10^{-5}
X_{rr}	18×10^{-5}
$X_{\delta\delta}$	-95×10^{-5}
$X_{u\delta\delta}$	-190×10^{-5}
X_{rv}	798×10^{-5}
$X_{v\delta}$	93×10^{-5}
$X_{uv\delta}$	93×10^{-5}

Çizelge 2.5 : Y kuvveti ve N momenti hidrodinamik katsayıları.

Katsayı sembolü	Katsayı değeri	Katsayı sembolü	Katsayı değeri
$Y_{\dot{v}}$	-748×10^{-5}	$N_{\dot{v}}$	4.646×10^{-5}
$Y_{\dot{r}}$	-9.354×10^{-5}	$N_{\dot{r}}$	-43.8×10^{-5}
Y_v	-1160×10^{-5}	N_v	-264×10^{-5}
Y_r	-499×10^{-5}	N_r	-166×10^{-5}
Y_{vvv}	-8078×10^{-5}	N_{vvv}	1636×10^{-5}
Y_{vvr}	15356×10^{-5}	N_{vvr}	-5483×10^{-5}
Y_{vu}	-1160×10^{-5}	N_{vu}	-264×10^{-5}
Y_{ru}	-499×10^{-5}	N_{ru}	-166×10^{-5}
Y_{δ}	278×10^{-5}	N_{δ}	-139×10^{-5}
$Y_{\delta\delta\delta}$	-90×10^{-5}	$N_{\delta\delta\delta}$	45×10^{-5}
$Y_{u\delta}$	556×10^{-5}	$N_{u\delta}$	-278×10^{-5}
$Y_{uu\delta}$	278×10^{-5}	$N_{uu\delta}$	-139×10^{-5}
$Y_{v\delta\delta}$	-4×10^{-5}	$N_{v\delta\delta}$	13×10^{-5}
$Y_{vv\delta}$	1190×10^{-5}	$N_{vv\delta}$	-489×10^{-5}

$$M_{ek \text{ kütle}} = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{r}} \\ 0 & N_{\dot{v}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$M \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ N \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} \\ 0 & mx_G - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} X &= X_u \Delta u + X_{uu} \Delta u^2 + X_{uuu} \Delta u^3 + X_{vv} v^2 + X_{rr} r^2 + X_{rv} rv + X_{\delta\delta} \delta^2 \\ &+ X_{u\delta\delta} u \delta^2 + X_{v\delta} v \delta + X_{uv\delta} \Delta u v \delta \\ Y &= Y_v v + Y_r r + Y_{vvv} v^3 + Y_{vvr} v^2 r + Y_{vu} v \Delta u + Y_{ru} r \Delta u + Y_{\delta} \delta + Y_{\delta\delta\delta} \delta^3 \\ &+ Y_{u\delta} \Delta u \delta + Y_{uu\delta} \Delta u^2 \delta + Y_{v\delta\delta} v \delta^2 + Y_{vv\delta} v^2 \delta \\ N &= N_v v + N_r r + N_{vvv} v^3 + N_{vvr} v^2 r + N_{vu} v \Delta u + N_{ru} r \Delta u + N_{\delta} \delta \\ &+ N_{\delta\delta\delta} \delta^3 + N_{u\delta} \Delta u \delta + N_{uu\delta} \Delta u^2 \delta + N_{v\delta\delta} v \delta^2 + N_{vv\delta} v^2 \delta \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ N \end{bmatrix}$$

$$\dot{u} = \frac{X}{m_{11}} \quad (2.12)$$

$$\dot{v} = \frac{m_{33} Y - m_{23} N}{m_{22} m_{33} - m_{23} m_{32}}$$

$$\dot{r} = \frac{-m_{32} Y + m_{22} N}{m_{22} m_{33} - m_{23} m_{32}}$$

Denklem 2.9'da $M_{ek\ k\tilde{u}t\tilde{u}l\tilde{e}}$ ek k\tilde{u}t\tilde{u}l\tilde{e} matrisinde yer alan katsayılar g\ddot{u}r\ddot{u}lmektedir. Denklem 2.7 ve Denklem 2.8'deki ivme terimlerinin katsayılarının d\ddot{u}zenlenmesi ile elde edilen M matrisi Denklem 2.10'da verilmiştir. M matrisi; gemi k\tilde{u}t\tilde{u}l\tilde{e}si, ek k\tilde{u}t\tilde{u}l\tilde{e} ve eylemsizlik katsayılarını i\c{c}ermektedir.

Denklem 2.11'de hidrodinamik kuvvetler ile itici kuvvetlerin toplamları verilmiştir. Δu terimi, geminin u_0 seyir hızı etrafındaki hız değişimini ifade etmektedir. Denklem 2.11'de yer alan $\Delta u-v-r$ hızlarından yalnızca bir tanesinin \c{c}arpını olan katsayılar doğrusal s\ddot{u}n\ddot{u}leme katsayılarıdır. Hızların karelerinin, k\ddot{u}plerinin veya \c{c}apraz \c{c}arpımlarının \c{c}arpan olduğu katsayılar ise doğrusal olmayan s\ddot{u}n\ddot{u}leme katsayılarıdır. D\ddot{u}men a\c{c}ısını ifade eden δ ifadesinin \c{c}arpan olduğu katsayılar itici kuvveti oluşturan d\ddot{u}men katsayılarıdır.

Denklem 2.12'de gemi dinamik modelinin neticelendiği, kuvvet toplamlarının k\tilde{u}t\tilde{u}l\tilde{e} matrisine b\ddot{o}l\ddot{u}m\ddot{u} ile elde edilen ivme eşitlikleri verilmiştir. G\ddot{u}vde eksen takımında elde edilen bu ivme ifadelerinin zamana bağlı integralleri ile gemi g\ddot{u}vde hızları ($u-v-r$) elde edilmektedir. Kestirim ve kontrol\ddot{o}r analizlerinde kullanılmak \ddot{u}zere, g\ddot{u}vde hızlarından d\ddot{u}nya eksen takımı hızlarına ge\c{c}iř Denklem 2.4'te verilen d\ddot{o}n\ddot{u}ř\ddot{u}m matrisi ile yapılmıştır.



3. MANEVRA MODELİNİN PARAMETRELERİNİN KESTİRİMİ

Bu bölümde mariner manevra modeline ait hidrodinamik sönümleme ve dümen katsayılarının kestirim çalışmaları yer almaktadır.

3.1 Model ve Kestirim Kabulleri

Bu tez çalışmasında, Çizelge 2.3 ile verilen gemi model parametrelerinin, Çizelge 2.4 ve Çizelge 2.5'te yer alan ek kütle katsayılarının ($X_{\dot{u}}$, $Y_{\dot{v}}$, $Y_{\dot{N}}$, $N_{\dot{v}}$, $N_{\dot{r}}$) bilindiği kabulüyle kestirim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kestirilecek parametreler X , Y kuvvetleri ve N momenti ile ilişkili sönümleme ve dümen katsayılarının bütünüdür. Kestirilecek parametrelerinin listesi Çizelge 3.1'de verilmiştir. Kestirim modeli, mariner modeli ile aynı yapıda oluşturulmuştur.

Çizelge 3.1 : Kestirilecek parametreler.

Manevra Modelinin Bilinmeyen Parametreleri	Bilinmeyen sayısı
$X_u, X_{uu}, X_{uuu}, X_{vv}, X_{rr}, X_{rv}, X_{\delta\delta}, X_{u\delta\delta}, X_{v\delta}, X_{uv\delta}$	10
$Y_v, Y_r, Y_{vvv}, Y_{vvr}, Y_{vu}, Y_{ru}, Y_{\delta}, Y_{\delta\delta\delta}, Y_{u\delta}, Y_{uu\delta}, Y_{v\delta\delta}, Y_{vv\delta}$	12
$N_v, N_r, N_{vvv}, N_{vvr}, N_{vu}, N_{ru}, N_{\delta}, N_{\delta\delta\delta}, N_{u\delta}, N_{uu\delta}, N_{v\delta\delta}, N_{vv\delta}$	12

Dümen ± 40 derecelik açı kısıtına ve 5 derece/saniye açısal hız kısıtına sahiptir. Dümen için giriş işareti oluşturulurken model kısıtları ve kestirilecek parametre sayısı göz önünde bulundurulmuştur. Dümen açısının doğru ölçüldüğü kabul edilmiştir. Simülasyon ortamında mariner gemisinden toplanan ileri hız, yanal hız ve sapmanın açısal hızı, verileri kullanılarak kestirilmiştir. Bu verilerin ölçülebildiği kabul edilmiştir. Ölçüm verileri, hız verilerinin gerçek değerlerinin üzerine beyaz gürültü eklenerek oluşturulmuştur. Literatürde çoğu kestirim çalışmalarında hız ölçümlerinin yanında ivme ölçümleri de kullanılmaktadır. Tezde kullanılan SAEKF kestirim yöntemi için hız ölçümü kullanılması yeterli olduğundan ivme ölçümleri kullanılmamıştır.

3.2 Kestirim Yöntemi

SAEKF yöntemi temelde Kalman filtresine dayanır. KF, ölçüm ile durumlar arasındaki ilişkinin ve sistemin kendisinin doğrusal olduğu, ölçümün sıfır ortalamalı Gauss gürültü olduğu kabullerine dayanır. Sistem veya ölçüm modelinin doğrusal olmadığı durumlar için EKF yöntemi geliştirilmiştir. EKF’de doğrusal olmayan sistem ile ölçüm modeli, doğrusallaştırılarak doğrusal ancak zamanla değişen bir durum uzayı modeli ile temsil edilebilir hale getirilir. EKF durum vektörüne kestirilecek parametrelerin eklenmesi ve durum matrisinin buna yönelik düzenlenmesi ile SAEKF yapısı elde edilir. Böylece durum kestiriminin yanında parametre kestirimi de yapılabilir KF yapısı elde edilmiş olur. SAEKF yöntemi için ayrı zamanda geliştirilmiş denklemler Bölüm 3.2.1’de verilmiştir.

3.2.1 SAEKF yöntemi için sistem modeli

Gerçek sisteme ait ayrık zamanlı sistem ve ölçüm modeli Denklem 3.1’de verilmiştir.

$$\begin{aligned}x_k &= f(x_{k-1}) + w_{k-1} \\y_k &= H_k x_k + v_k\end{aligned}\tag{3.1}$$

$w_k \sim (0, Q_k)$: Beklenen değeri sıfır olan Q varyanslı beyaz gürültü

$v_k \sim (0, R_k)$: Beklenen değeri sıfır olan R varyanslı beyaz gürültü

Denklem 3.1’de x durumları, f sistem modelini, w sistem gürültüsünü, y ölçüm çıktısını, H ölçüm modelini, v ölçüm gürültüsünü, alt indis k ayrık zamanda verinin ait olduğu anı ifade etmektedir.

SAEKF yöntemi tahmin ve güncelleme olarak iki adımdan oluşmaktadır. Tahmin adımları Denklem 3.2’de verilmiştir.

$$\begin{aligned}F &= \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}_k} \\ \hat{x}_{k+1}^- &= F_k \hat{x}_k + B U_k \\ P_{k+1}^- &= F_k P_k F_k' + Q\end{aligned}\tag{3.2}$$

Denklem 3.2’de \hat{x} kestirilen durumları, F durumlara göre sistem modelinin kısmi türevi alınarak oluşturulan SAEKF durum matrisini, B kontrol matrisini, U kontrol

işaretini, P hata kovaryans matrisini, üst indis – tahmin adımında (güncelleme adımı öncesinde) hesaplanan değerleri ifade etmektedir.

Güncelleme adımları Denklem 3.3'te verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 H &= \left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}_k} \\
 K &= P_k^- H' (H P_{k+1}' H' + R)^{-1} \\
 \hat{x}_{k+1}^+ &= \hat{x}_{k+1}^- + K(y_{k+1} - H_k \hat{x}_{k+1}^-) \\
 P_{k+1}^+ &= (I - KH) P_{k+1}^-
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Denklem 3.3'te H durumlara göre ölçüm modelinin kısmi türevi alınarak oluşturulan ölçüm matrisini, K Kalman kazancını, I birim matrisi, üst indis + güncelleme adımında hesaplanan değerleri ifade etmektedir.

Matris boyutları Çizelge 3.2'de verilmiştir. Çizelge 3.2'de m kestirilecek parametreler ile durumların toplam sayısını, n ölçüm sayısını, k kontrol giriş vektörünün boyutunu ifade etmektedir.

Çizelge 3.2 : SAEKF parametre matrislerinin boyutları.

Matris ve Boyutu		Matris ve Boyutu	
\hat{x}	$m \times 1$	H	$n \times m$
F	$m \times m$	R	$n \times n$
B	$m \times k$	K	$m \times n$
U	$k \times 1$	y	$n \times 1$
P	$m \times m$	I	$m \times m$

3.2.2 SAEKF yönteminin mariner manevra modeline uyarlanması

Bu bölümde, Bölüm 3.2.1'de genel yapısı verilen SAEKF yönteminin parametre kestirimi için mariner manevra modeline uyarlanması anlatılmaktadır. Tez kapsamında 34 parametrenin kestirimi gerçekleştirilmiştir. Kestirim parametresi sayısının fazla oluşu denklemlerin yazımını ve anlaşılmasını zorlaştırmaktadır. Bu sebeple manevra modeli özelindeki SAEKF uyarlamasının anlatımı için Denklem 3.4 ile verilen basitleştirilmiş örnek bir model kullanılmıştır. Tezde kullanılan 34 parametrelilik model için durum matrisi EK A'da verilmiştir.

$$X = X_{uu}u^2 + X_{vr}vr + X_{\delta\delta}\delta^2$$

$$Y = Y_vv + Y_rr + Y_{vvr}v^2r$$

$$N = N_vv + N_rr + N_{vvr}v^2r$$

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_X & 0 & 0 \\ 0 & m_Y & -m_{YN} \\ 0 & -m_{YN} & m_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ N \end{bmatrix}$$

$$\dot{x} \cong \frac{x_{k+1} - x_k}{t_{k+1} - t_k} = \frac{x_{k+1} - x_k}{\Delta t}$$

$$u_{k+1} = u_k + \dot{u}\Delta t$$

$$v_{k+1} = v_k + \dot{v}\Delta t$$

$$r_{k+1} = r_k + \dot{r}\Delta t$$

$$u_{k+1} = u_k + (m_x(X_{uu}u^2 + X_{vr}vr + X_{\delta\delta}\delta^2))\Delta t$$

$$v_{k+1} = v_k + (m_Y(Y_vv + Y_rr + Y_{vvr}v^2r) - m_{YN}(N_vv + N_rr + N_{vvr}v^2r))\Delta t$$

$$r_{k+1} = r_k + (-m_{YN}(Y_vv + Y_rr + Y_{vvr}v^2r) + m_N(N_vv + N_rr + N_{vvr}v^2r))\Delta t$$

Örnek modelde kestirilecek parametreler X_{uu} , X_{vr} , $X_{\delta\delta}$, Y_v , Y_r , X_{vvr} , N_v , N_r , N_{vvr} olmak üzere toplamda 9 adettir. Örnek model için uyarlanan SAKEF denklemleri Denklem 3.5-3.7'de verilmiştir.

SAEKF durum matrisi ve durum vektörü Denklem 3.5'te verilmiştir.

$$\hat{x}_k = [\hat{u}_k \quad \hat{v}_k \quad \hat{r}_k \quad \hat{X}_{uu_k} \quad \hat{X}_{vr_k} \quad \hat{X}_{\delta\delta_k} \quad \hat{Y}_{v_k} \quad \hat{Y}_{r_k} \quad \hat{Y}_{vvr_k} \quad \hat{N}_{v_k} \quad \hat{N}_{r_k} \quad \hat{N}_{vvr_k}]'$$

$$F_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \dots \\ & & & 0_{9 \times 3} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\begin{bmatrix} m_X \hat{u}_k^2 \Delta t & m_X \hat{v}_k \hat{r}_k \Delta t & m_X \delta^2 \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_Y \hat{v}_k \Delta t & m_Y \hat{r}_k \Delta t & m_Y \hat{v}_k^2 \hat{r}_k \Delta t & m_{YN} \hat{v}_k \Delta t & m_{YN} \hat{r}_k \Delta t & m_{YN} \hat{v}_k^2 \hat{r}_k \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & m_{YN} \hat{v}_k \Delta t & m_{YN} \hat{r}_k \Delta t & m_{YN} \hat{v}_k^2 \hat{r}_k \Delta t & m_N \hat{v}_k \Delta t & m_N \hat{r}_k \Delta t & m_N \hat{v}_k^2 \hat{r}_k \Delta t \\ & & & & & & & & & & & I_{9 \times 9} \end{bmatrix}$$

Denklem 3.5'te \hat{x}_k Kalman filtresinin durumlarını ifade etmektedir. Parametre kestiriminin de gerçekleştirebilmesi için, durum vektörü kestirilecek parametreler ile arttırılmıştır. \hat{x}_k Kalman filtesi durum vektörünün ilk üç elemanı durumlar, yani hızlar, diğer elemanları ise kestirilecek parametrelerdir.

Denklem 3.4'te u_{k+1} , v_{k+1} , r_{k+1} eşitlikleri ile verilen sistem modeli, Denklem 3.5'te F_k SAEKF durum matrisine dönüştürülmüştür. F_k içerisinde kestirilecek durumlar olan \hat{u}_k , \hat{v}_k , \hat{r}_k terimleri yer almaktadır. Buradaki hız terimleri bir önceki adımda kestirilmiş değerlerdir, yani bilinmektedirler. Bu sayede F_k Kalman filtresinin denklemlerinde sabit katsayılar şeklinde yazılabilmektedirler.

Denklem 3.6'da SAEKF tahmin ve güncelleme adımları verilmiştir.

$$\hat{x}_{k+1}^- = F_k \hat{x}_k$$

$$P_{k+1}^- = F_k P_k F_k'$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} 0_{3 \times 9} \quad (3.6)$$

$$K = P_k^- H' (H P_{k+1}^- H' + R)^{-1}$$

$$y_{k+1} = [u_m \quad v_m \quad r_m]'$$

$$\hat{x}_{k+1}^+ = \hat{x}_{k+1}^- + K(y_{k+1} - H_k \hat{x}_{k+1}^-)$$

$$P_{k+1}^+ = (I - KH)P_{k+1}^-$$

Denklem 3.6'da verilen H ölçüm matrisi ile tahmin adımında hesaplanan \hat{x}_{k+1}^- vektörü çarpılarak ölçüm tahminleri elde edilmektedir. y_{k+1} ölçüm matrisi ile ölçüm tahminin farkı alınarak ölçüm hatası oluşturulmaktadır. Ölçüm hatası ile Kalman kazancının çarpımı ile tahmin adımında hesaplanan durumlar toplanarak güncellenmiş durumlar elde edilmektedir.

Mariner manevra modeli için yapılan kestirim işleminde, kestirilecek parametre sayısı toplamda 34'tür. Mariner manevra modeli için SAEKF tasarımı yapılırken de Denklem 3.4-3.6'daki adımlar takip edilmiştir.

3.3 Kestirim Çalışmaları

3.3.1 Giriş işaretinin belirlenmesi

Sistem tanıma deneylerinde, parametre kestirim sonucunun doğruluğunu sağlamak için, kestirilecek parametre sayısı göz önüne alınarak, sistemin uygun bir giriş işareti ile uyarılması gerekmektedir. Tanıma deneyinde kullanılan giriş işaretinin sistemi

yeterli derecede uyarıp uymadığı “kesintisiz uyarma (persistent excitation)” analizi ile anlaşılabilir.

Kestirilecek parametre sayısı 34 olan bir sistemde, parametrelerin doğru kestirilebilmesi için kullanılan giriş işaretinin kesintisiz uyarma mertebesinin en az 34 olması gerekmektedir. Bir giriş işaretinin, frekans spektrumunda genliğin en büyük değerinin yüzde birinin üzerinde kalan genliklere ait frekans sayısına bakılarak işaretin uyarma mertebesi belirlenebilir [27].

Kestirim çalışmalarında uyarma mertebesi zengin giriş işareti elde etmek için farklı frekans ve genliklerde işaretler kullanılmıştır.

3.3.2 Model doğrulama testleri

Bir tanıma deneyi sonucunda elde edilen modelin ve parametrelerinin doğruluğuna ancak beyazlık ve bağımsızlık testleri yapıldıktan sonra karar verilebilir.

Beyazlık testi

Beyazlık testinde, aynı giriş işareti altında gerçek sistemin ve kestirilen modelin çıkışları arasındaki farka bakılır. Bu fark kestirim hatası olarak adlandırılır. Kestirilen modelinin doğru olduğu durumda kestirim hatası yalnızca ölçüm gürültüsünü içerecektir. Bu durumu açıklayan kuramsal analiz Denklem 3.7’de verilmiştir.

$$y(t) = G(q^{-1})u(t) + e(t) \quad (3.7)$$

$$\varepsilon(t) = y(t) - \hat{y}(t) = G(q^{-1})u(t) + e(t) - \hat{G}(q^{-1})u(t) = e(t)$$

$e(t) \sim (0, \sigma^2)$: Beklenen değeri sıfır olan σ^2 varyanslı beyaz gürültü

Denklem 3.7’de y sistem çıktısı, G sistem modeli, y model çıktısı, u giriş işareti, e ölçüm gürültüsü, \hat{G} kestirim modeli, \hat{y} kestirim modeli çıktısı ve ε kestirim hatasıdır. Kestirim modeli gerçek sistem ile aynı olduğunda kestirim hatası ölçüm gürültüsüne eşit olacaktır. Model doğrulama testlerinde kestirim ve ölçüm hatası ilişkisinin anlaşılabilmesi için kestirim hatasının korelasyonuna bakılır. Başarılı bir kestirim gerçekleştiği durumda kestirim hatasının korelasyon analizi sonucunun, ölçüm gürültüsüne benzer karakteristiği sergilemesi beklenir.

Beyazlık testi için kullanılan ilişkiler Denklem 3.8’de verilmiştir.

$$\hat{r}_\varepsilon(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-\tau} \varepsilon(t+\tau)\varepsilon(t) \quad (3.8)$$

$$x(\tau) = \frac{\hat{r}_\varepsilon(\tau)}{\hat{r}_\varepsilon(0)}$$

Denklem 3.8'de N ölçüm verisi sayısı, τ zaman farkı, \hat{r}_ε farklı τ değerleri için kestirim hatası kovaryans değeridir. Sıfırdan farklı tüm τ değerleri için $x(\tau) \leq \frac{1.96}{\sqrt{N}}$ olduğu görülürse beyazlık testi sonucu başarılı sayılır [27].

Bağımsızlık testi

Bağımsızlık testinde hedeflenen, kestirim hatasının giriş işaretinden bağımsız olduğunu göstermektir. Bu durumun nedenini açıklayan kuramsal analiz Denklem 3.9'da verilmiştir.

$$y(t) = G(q^{-1})u(t) + e(t) \quad (3.9)$$

$$\varepsilon(t+\tau) = y(t+\tau) - \hat{y}(t+\tau) = e(t+\tau)$$

Denklem 3.9'da görüldüğü üzere, kestirim modelinin doğru olduğu durumda kestirim hatasının gelecek değerleri de sadece ölçüm gürültüsüne bağlı olacaktır. Giriş ve çıkışın geçmiş değerleri için bağımsızlık ancak açık çevrimli sistemlerde geçerlidir. Kapalı çevrimli sistemlerde çıkış işareti giriş (kontrol) işaretinin gelecekteki değerini belirlediğinden geçmişe yönelik bağımsızlıktan söz edilemez.

Bağımsızlık testi için kullanılan ilişkiler Denklem 3.10'da verilmiştir.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-\tau} \varepsilon(t+\tau)u(t), & \tau \geq 0 \\ \frac{1}{N} \sum_{t=1-\tau}^N \varepsilon(t+\tau)u(t), & \tau < 0 \end{cases} \quad (3.10)$$

Açık çevrimli sistemlerde tüm τ değerleri için $x(\tau) \leq \frac{1.96}{\sqrt{N}}$ bulunursa bağımsızlık testi sonucu başarılı sayılır [27].

3.3.3 Kestirim ve doğrulama sonuçları

Simülasyon koşumlarında ileri hız başlangıç değeri seyir hızıdır. Yanal hız ve sapmanın açısal hızının başlangıç değeri sıfırdır.

Ölçüm gürültüsü standart sapma değerleri çizgisel hızlar için 0.01 m/s , açısal hızlar için 0.01 der/s seçilmiştir.

Senaryolarda kullanılan sinüs formundaki işaretlerin genel yapısı $A \sin(2\pi ft)$ şeklindedir. Burada A genliği, f frekansı, t ise zamanı ifade etmektedir. Belirli süre uygulanan sabit dümen açıları \pm derece şeklinde yönleri belirtilerek verilmiştir.

Kestirim işlemi ve doğrulama adımları için ayrı koşumlar oluşturulmuştur. Her kestirim-doğrulama koşum çifti bir senaryo başlığı altında toplanmıştır.

Kestirim işlemi ve doğrulama çalışmalarını sergilemek amacıyla 4 senaryo oluşturulmuştur.

Senaryo 1’de kestirim işlemi için uyarma mertebesi yeterli olan, fakat gemiyi doğrusal çalışma bölgesinde tutan, aynı genlikli-zıt işaretli giriş işaretleri kullanılmıştır.

Senaryo 2’de kestirim koşumunda Senaryo 1’deki gibi basamak giriş uygulanmıştır. Senaryo 2’de modeli farklı çalışma bölgelerinde uyarabilmek için genlikleri farklı giriş işaretleri seçilmiştir.

Senaryo 3’te kestirim koşumunda, model iki farklı açıda zigzag hareketi sergileyecek şekilde uyarılmıştır. Zigzag hareketinde; uygulanan sabit açıdaki dümen girişiyle aynı değerdeki sapma açısına gemi ulaşınca, dümen aynı açı değerinde zıt yöne çevirilir. Zigzag hareketi gemi manevraları incelenirken yapılan gemicilik testlerinden biridir.

Senaryo 4’te ise kestirim koşumunda farklı genlik ve frekanslarda sinüs biçiminde giriş işaretleri uygulanmıştır.

Her senaryoda kestirim koşumlarının devamında parametre kestirim sonuçları yer almaktadır. SAEKF’nin ölçüm verisini filtreleme performansına örnek göstermek amacıyla yalnızca Senaryo 1’de hız kestirimi sonuçları verilmiştir.

Parametre kestirim sonuçlarının verildiği çizelgelerde ilk satır parametre ismini, ikinci satır parametrenin gerçek değerini, üçüncü satır kestirim sonucunu, son satır da yüzdesel hatayı vermektedir. Hatanın artı ya da eksi değerli oluşu kestirim sonucunun gerçek değerinin altında ya da üstünde kaldığını belirtmek içindir.

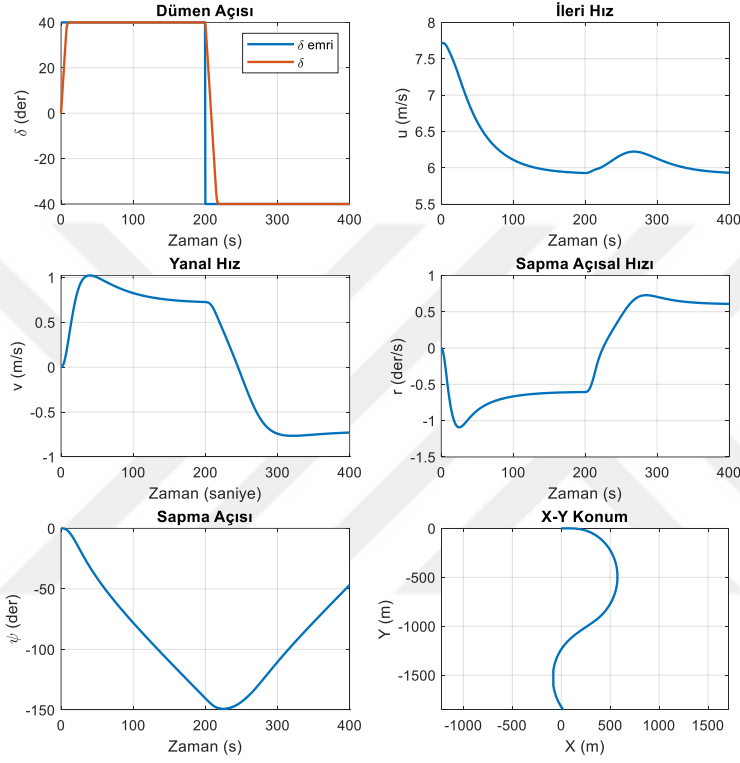
Parametre kestirim sonuçlarının ardından doğrulama koşumları ve korelasyon analizleri gelmektedir. Kestirilen model ile gerçek modele ait sonuçlar doğrulama koşum şekillerinde karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Korelasyon analizleri, doğrulama koşumlarında ölçüm verisi olarak toplanan ileri hız, yanal hız ve sapma hızı ile yapılmıştır. Senaryo özelindeki yorumlar korelasyon analizi sonuçlarından sonra verilmiştir.



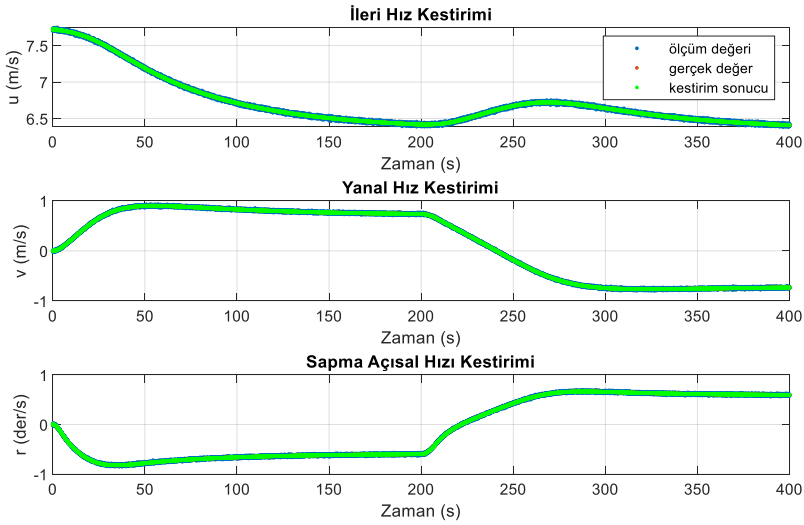
3.3.3.1 Senaryo 1

Çizelge 3.3 : Senaryo 1 – Kestirim koşumu giriş işareti (kesintisiz uyarma mertebesi 50).

Başlangıç Zamanı	Giriş İşareti
0. saniye	+40 derece
200. saniye	-40 derece



Şekil 3.1 : Senaryo 1 - Kestirim koşumu.



Şekil 3.2 : Senaryo 1 - Hız kestirimi sonuçları.

Çizelge 3.4 : Senaryo 1 - X kuvveti parametreleri kestirim sonuçları.

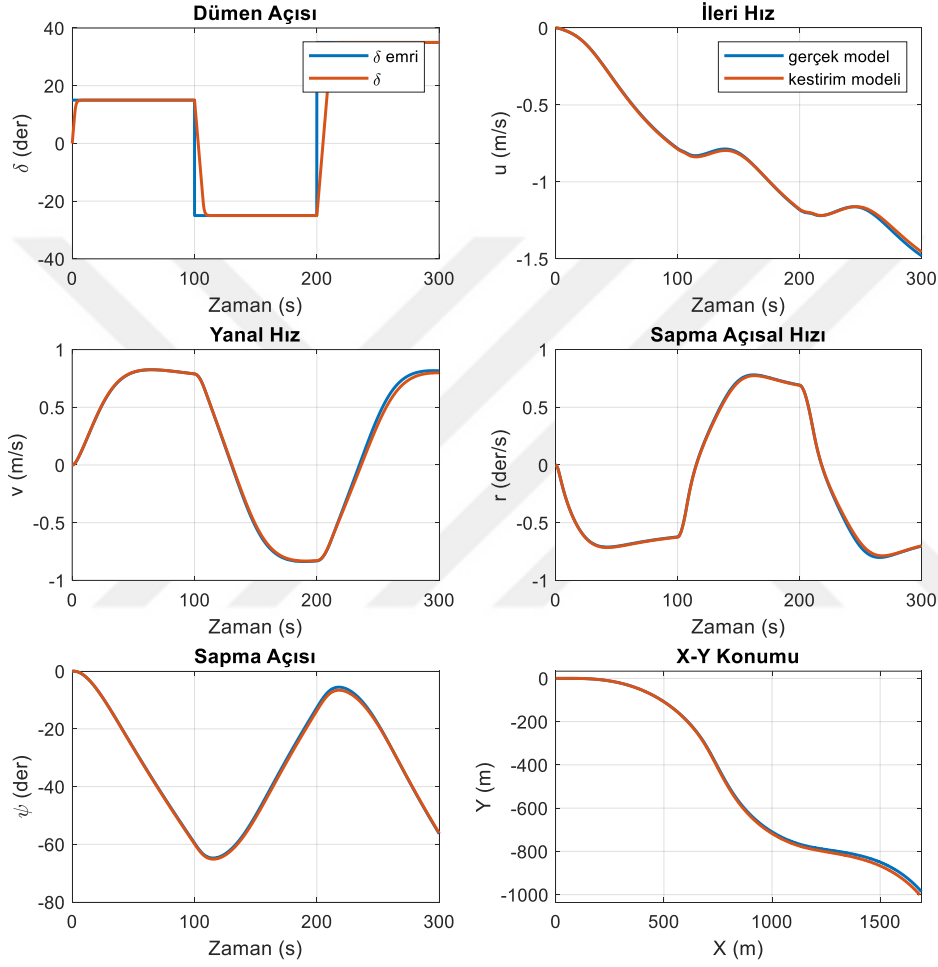
	Xu	Xuu	Xuuu	Xvv	Xrv
Gerçek	-0,00184	-0,0011	-0,00215	-0,00899	0,00798
Kestirim	-0,0017673	-0,000095	0,0002688	-0,0098046	0,007451
% Hata	3,95	91,35	112,5	-9,06	6,62
	Xrr	Xdv	Xdd	Xuvd	Xudd
Gerçek	0,00018	0,00093	-0,00095	-0,0019	0,00093
Kestirim	0,0000247	0,0012648	-0,0009614	0,0024864	-0,0018762
% Hata	86,25	-36,001	-1,2	230,86	301,74

Çizelge 3.5 : Senaryo 1 - Y kuvveti ve N momenti parametreleri kestirim sonuçları.

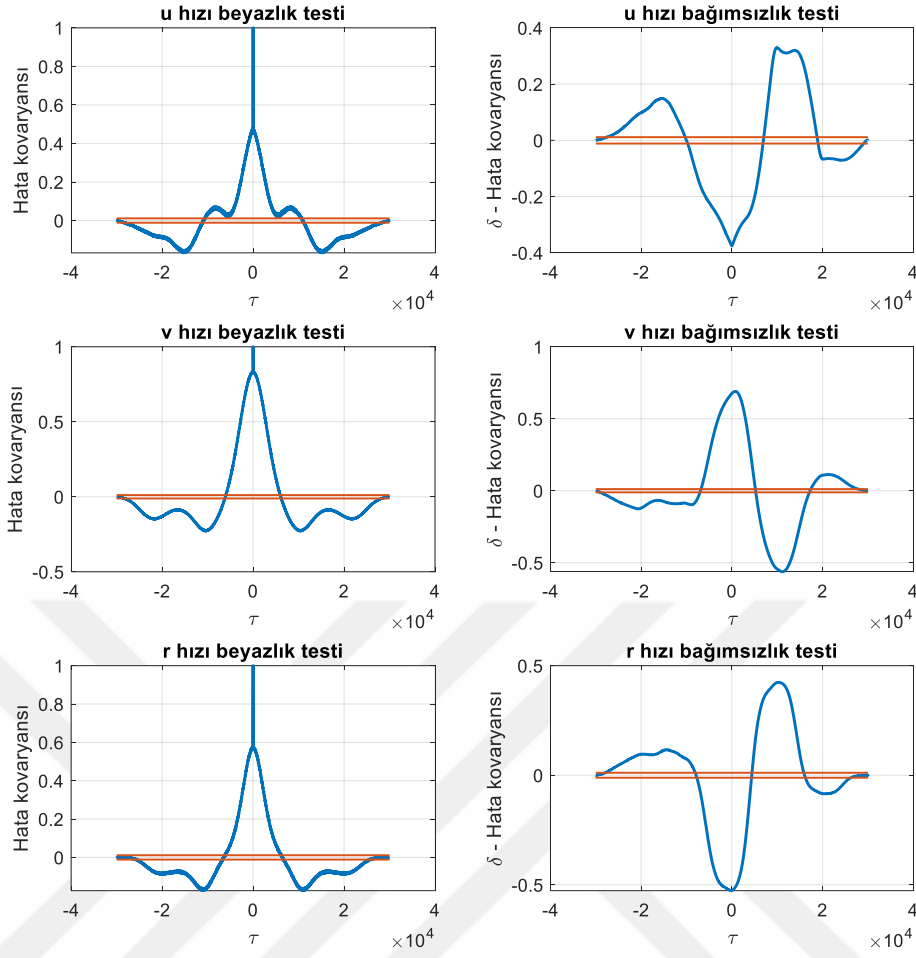
	Yv	Nv	Yr	Nr	Yd
Gerçek	-0,0116	-0,00264	-0,00499	-0,00166	0,00278
Kestirim	-0,01261	-0,00275	-0,00536	-0,00168	0,00277
% Hata	-8,67	-4,204	-7,38	-1,02	0,49
	Nd	Yvu	Nvu	Yru	Nru
Gerçek	-0,00139	-0,0116	-0,00264	-0,00499	-0,00166
Kestirim	-0,0014	-0,01097	-0,00285	-0,00391	-0,00164
% Hata	-0,74	5,401	-7,78	21,73	1,34
	Yud	Nud	Yuud	Nuud	Yvvv
Gerçek	0,00556	-0,00278	0,00278	-0,00139	-0,08078
Kestirim	0,00652	-0,00278	0,00472	-0,00165	-0,04991
% Hata	-17,18	0,14	-69,61	-18,96	38,21
	Nvvv	Yvvr	Nvvr	Yvvd	Nvvd
Gerçek	0,01636	0,15356	-0,05483	0,0119	-0,00489
Kestirim	0,01767	0,17489	-0,05428	0,02747	-0,00426
% Hata	-7,98	-13,88	1,002	-130,807	12,81
	Yvdd	Nvdd	Yddd	Nddd	
Gerçek	-0,00004	0,00013	-0,0009	0,00045	
Kestirim	0,0005	0,00033	-0,00161	0,00054	
% Hata	1339,17	-157,62	-78,66	-20,18	

Çizelge 3.6 : Senaryo 1 - Doğrulama koşumu giriş işareti.

Başlangıç Zamanı	Giriş İşareti
0. saniye	+15 derece
100. saniye	-25 derece
200. saniye	+35 derece



Şekil 3.3 : Senaryo 1 - Doğrulama koşumu.



Şekil 3.4 : Senaryo 1 - Korelasyon analizi sonuçları.

Senaryo 1 sonucu

Senaryo 1 için parametre kestiriminde kullanılan ölçüm verilerinin toplandığı kestirim koşumu Şekil 3.1'de görülmektedir. Çizelge 3.3'te kestirim koşumunda kullanılan giriş işareti verilmiştir. Şekil 3.2'de hız durumları kestirimi sonuçları görülmektedir. Gerçek veriler ile durum kestirimleri çok yakın değerlerdedir. SAEKF yönteminin beyaz gürültü içeren ölçümleri filtrelemede başarılı olduğu görülmektedir. Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5'te parametre kestirim sonuçları görülmektedir. Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5 hakkındaki değerlendirme Senaryo 2'nin sonuç kısmındadır.

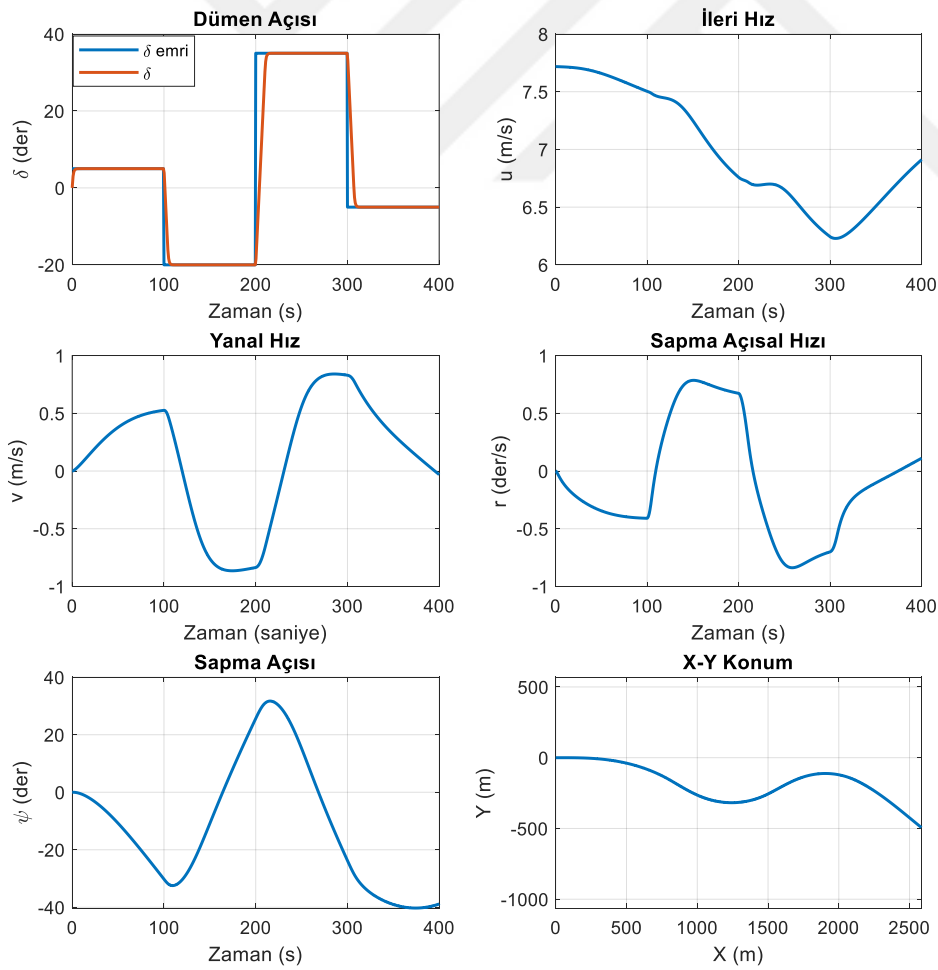
Çizelge 3.6'da doğrulama koşumunda kullanılan giriş işareti verilmiştir. Doğrulama koşumundaki giriş işareti, kestirim koşumunda modelin uyarılmadığı dümen açarından seçilmeye çalışılmıştır. Burada kestirim yaparken modelin uyarımının yetersiz kaldığı durumlarda karşılaşılabilecek korelasyon analizine ait kötü sonuçlar gösterilmek istenmiştir. Şekil 3.3'te doğrulama koşumu sonuçları görülmektedir. Şekil

3.3'te kestirim modeli ile gerçek modelin yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Fakat Şekil 3.4'te verilen korelasyon analizleri incelendiğinde yatay düz çizgiler ile gösterilen sınırların üstünde yüksek kovaryans değerlerinde sonuçların alındığı görülmüştür. Bu sebeple Senaryo 1'de yapılan kestirimin yeterli başarı düzeyinde olmadığı değerlendirilmiştir.

3.3.3.2 Senaryo 2

Çizelge 3.7 : Senaryo 2 – Kestirim koşumu giriş işareti (kesintisiz uyarma mertebesi 87).

Başlangıç Zamanı	Giriş İşareti
0. saniye	+5 derece
100. saniye	-20 derece
200. saniye	+35 derece
300. saniye	-5 derece



Şekil 3.5 : Senaryo 2 - Kestirim koşumu.

Çizelge 3.8 : Senaryo 2 - X kuvveti parametreleri kestirim sonuçları.

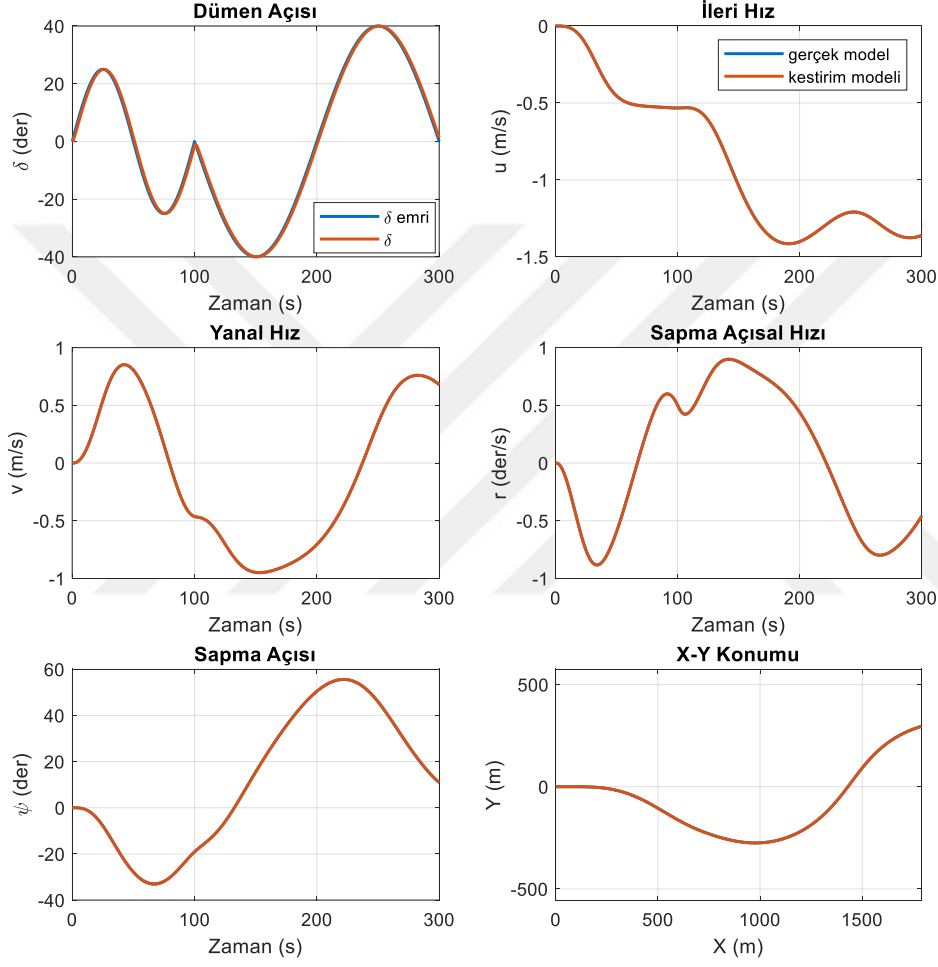
	Xu	Xuu	Xuuu	Xvv	Xrv
Gerçek	-0,00184	-0,0011	-0,00215	-0,00899	0,00798
Kestirim	-0,0018455	-0,0011323	-0,0021488	-0,0086281	0,0082083
% Hata	-0,3004	-2,93	0,05	4,02	-2,86
	Xrr	Xdv	Xdd	Xuvd	Xudd
Gerçek	0,00018	0,00093	-0,00095	-0,0019	0,00093
Kestirim	0,0002068	0,0009401	-0,0009545	0,0008079	-0,0019067
% Hata	-14,86	-1,08	-0,46	142,52	305,02

Çizelge 3.9 : Senaryo 2 - Y kuvveti ve N momenti parametreleri kestirim sonuçları.

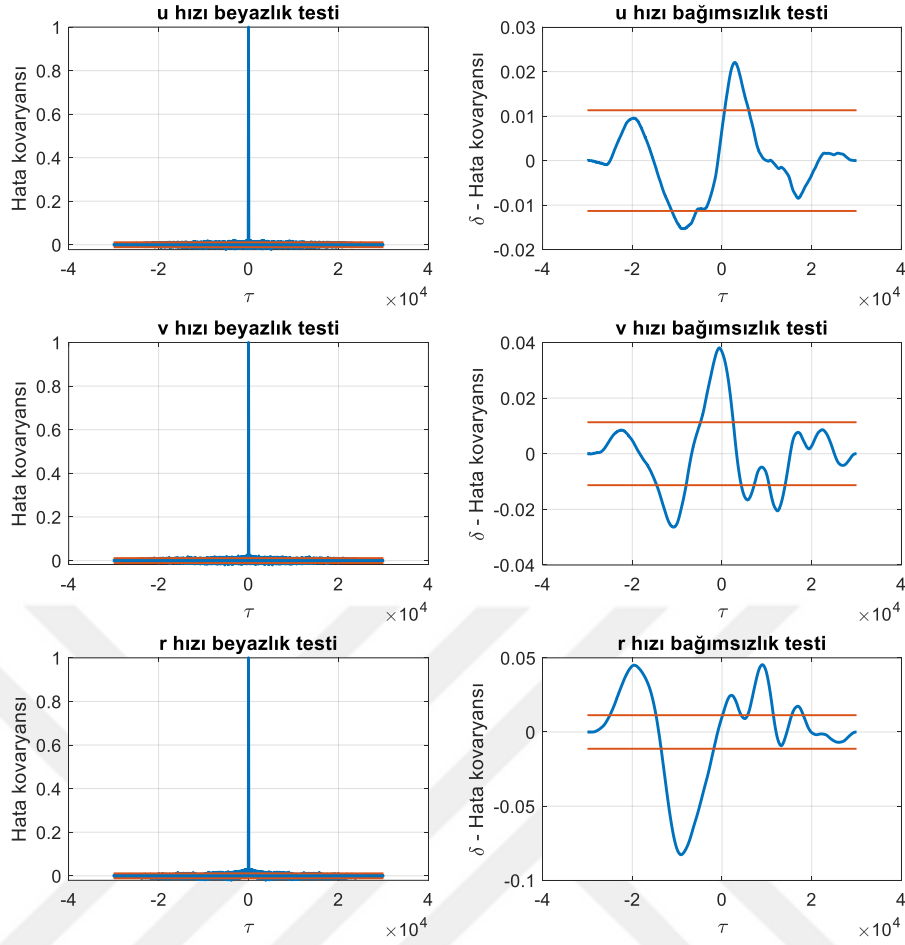
	Yv	Nv	Yr	Nr	Yd
Gerçek	-0,0116	-0,00264	-0,00499	-0,00166	0,00278
Kestirim	-0,01155	-0,0026	-0,00496	-0,00164	0,00279
% Hata	0,38	1,35	0,61	1,204	-0,4008
	Nd	Yvu	Nvu	Yru	Nru
Gerçek	-0,00139	-0,0116	-0,00264	-0,00499	-0,00166
Kestirim	-0,00138	-0,01162	-0,0027	-0,00488	-0,00167
% Hata	0,47	-0,18	-2,33	2,29	-0,71
	Yud	Nud	Yuud	Nuud	Yvvv
Gerçek	0,00556	-0,00278	0,00278	-0,00139	-0,08078
Kestirim	0,00549	-0,00286	0,00273	-0,00161	-0,08802
% Hata	1,31	-3,04	1,82	-15,73	-8,96
	Nvvv	Yvvr	Nvvr	Yvvd	Nvvd
Gerçek	0,01636	0,15356	-0,05483	0,0119	-0,00489
Kestirim	0,01295	0,15031	-0,05627	0,01095	-0,00555
% Hata	20,85	2,11	-2,63	8,01	-13,40
	Yvdd	Nvdd	Yddd	Nddd	
Gerçek	-0,00004	0,00013	-0,0009	0,00045	
Kestirim	-0,00005	0,00018	-0,00095	0,00043	
% Hata	-14,05	-40,28	-5,508	4,61	

Çizelge 3.10 : Senaryo 2 - Doğrulama koşumu giriş işareti.

Başlangıç Zamanı	İşaret Genliği (A)	İşaret frekansı (f)
0. saniye	25 derece	0,01 1/saniye
100. saniye	40 derece	0,005 1/saniye



Şekil 3.6 : Senaryo 2 - Doğrulama koşumu.



Şekil 3.7 : Senaryo 2 - Korelasyon analiz sonuçları.

Senaryo 2 sonucu

Senaryo 2 için kestirim koşumu giriş işareti Çizelge 3.7’de, kestirim koşumu Şekil 3.5’te verilmiştir. Bu koşulda Senaryo 1’deki gibi basamak giriş kullanılmıştır. Fakat düşük ve yüksek genlikli dümen açıları ile gemi farklı çalışma bölgelerinde uyarılmaya çalışılmıştır. Çizelge 3.8 ve Çizelge 3.9’da parametre kestirim sonuçları görülmektedir. Çizelge 3.8 ve Çizelge 3.9 geneline bakıldığında, Senaryo 1’deki hatalara kıyasla daha düşük hata yüzdeleri görülmektedir.

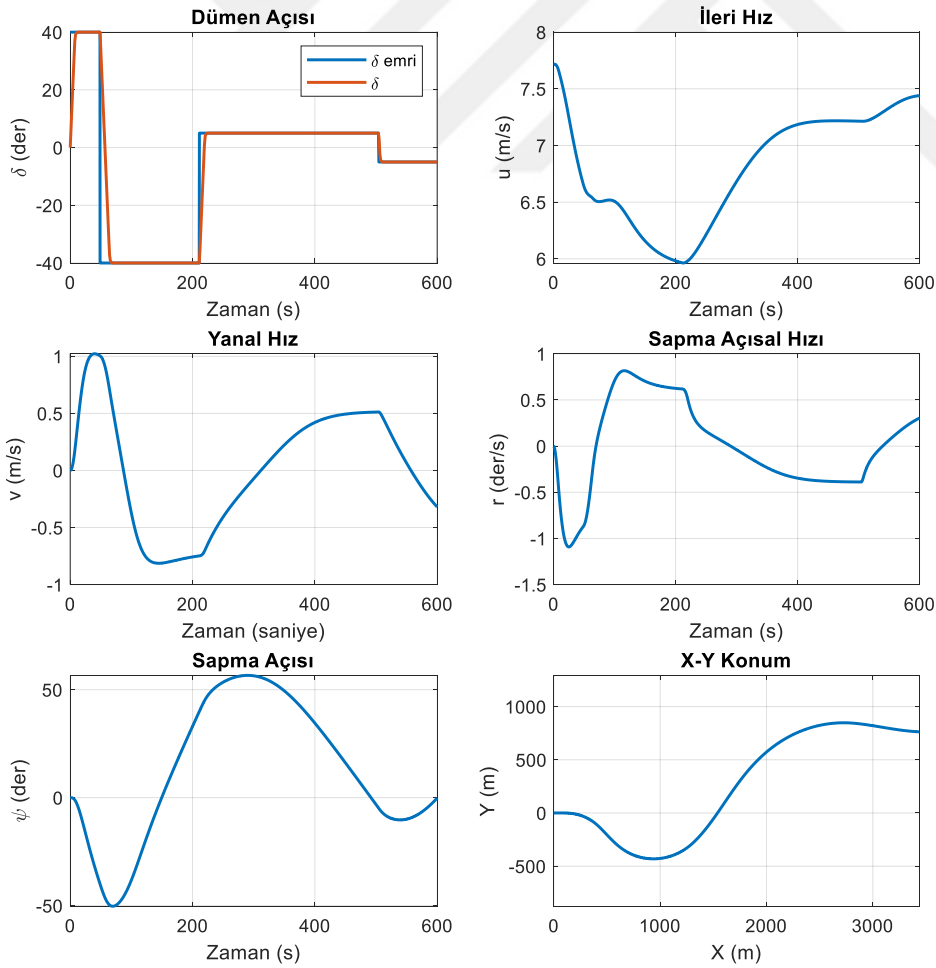
Çizelge 3.10’da doğrulama koşumu giriş işareti ve Şekil 3.6’da doğrulama koşumu verilmiştir. Kestirim ve doğrulama adımlarında yapılan testleri bağımsızlaştırmak için doğrulama adımında sinüs yapısında giriş işareti kullanılmıştır. Sinüslerin genlikleri kestirimde kullanılan giriş işaret genliklerinden farklı seçilmiştir. Şekil 3.6 incelendiğinde gerçek model sonuçları ile kestirim modeli sonuçlarının çok yakın olduğu görülmektedir. Şekil 3.7’de verilen beyazlık testine ait sonuçlarda hatanın

kovaryansının τ değerinin sıfır olduğu durumda bir olduğu yani hatanın beyaz gürültü özelliğinde olduğu görülmektedir. Beyazlık testleri, yapılan kestirimin yeterli doğrulukta olduğunu teyit etmektedir. Beyazlık testi sonuçları göz önünde bulundurularak, bağımsızlık testindeki yer yer olan sınır aşımalarının kabul edilebilir seviyede olduğu düşünülmüştür.

3.3.3.3 Senaryo 3

Çizelge 3.11 : Senaryo 3 - Kestirim koşumu giriş işareti (kesintisiz uyarma mertebesi 165).

Başlangıç Zamanı	Giriş İşareti
0. saniye	+40 derece
Sapma açısı -40 dereceye ulaştığında	-40 derece
Sapma açısı +40 dereceye ulaştığında	+5 derece
Sapma açısı -5 dereceye ulaştığında	-5 derece



Şekil 3.8 : Senaryo 3 - Kestirim koşumu.

Çizelge 3.12 : Senaryo 3 - X kuvveti parametreleri kestirim sonuçları.

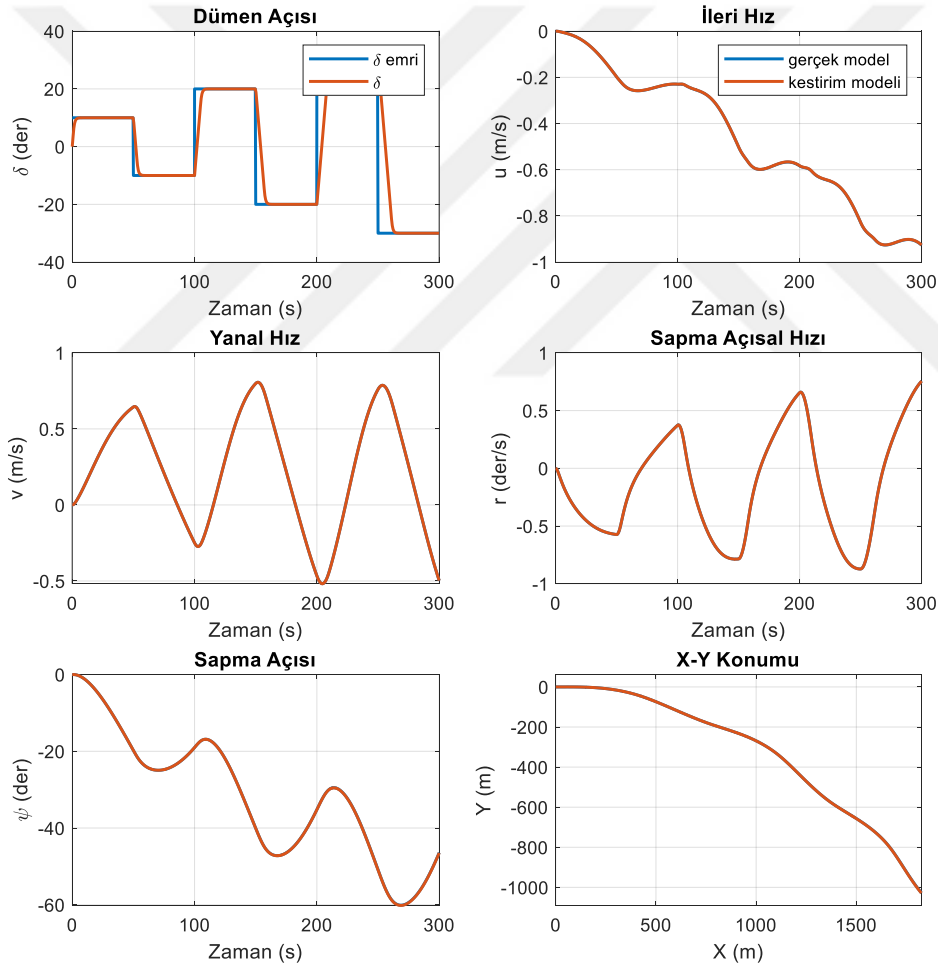
	Xu	Xuu	Xuuu	Xvv	Xrv
Gerçek	-0,00184	-0,0011	-0,00215	-0,00899	0,00798
Kestirim	-0,0018332	-0,0010152	-0,001899	-0,0086654	0,0081893
% Hata	0,37	7,704	11,67	3,61	-2,62
	Xrr	Xdv	Xdd	Xuud	Xudd
Gerçek	0,00018	0,00093	-0,00095	-0,0019	0,00093
Kestirim	0,0002169	0,0009084	-0,0009496	0,0007206	-0,0018773
% Hata	-20,49	2,32	0,046	137,92	301,86

Çizelge 3.13 : Senaryo 3 - Y kuvveti ve N momenti parametreleri kestirim sonuçları.

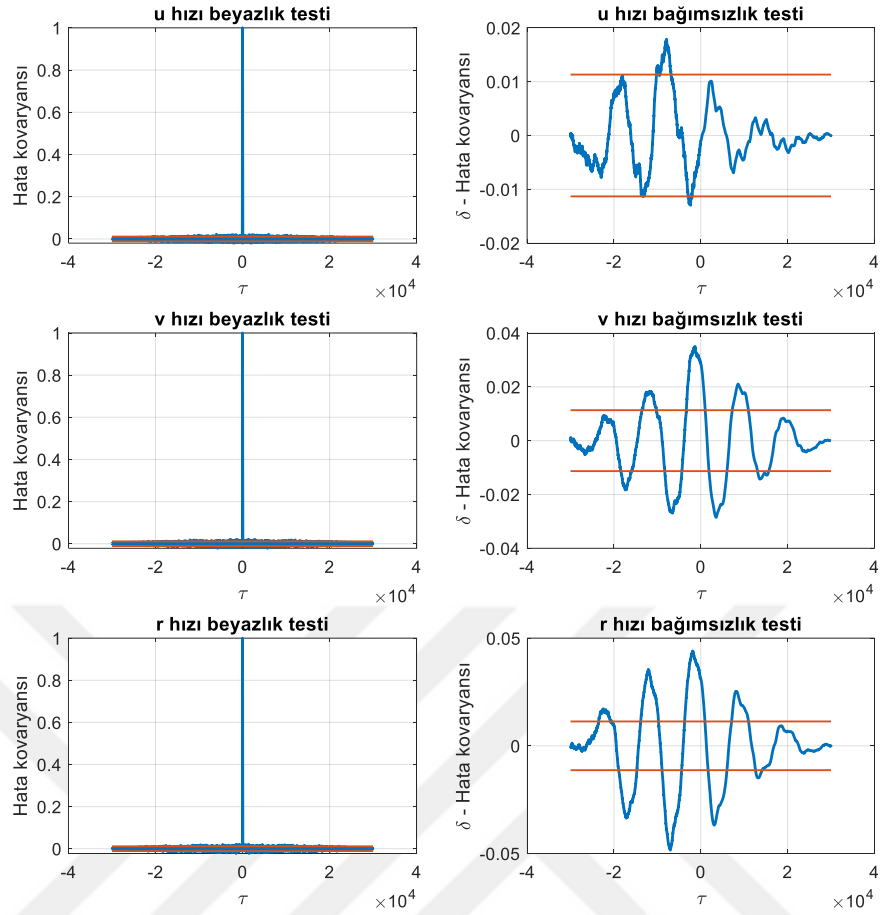
	Yv	Nv	Yr	Nr	Yd
Gerçek	-0,0116	-0,00264	-0,00499	-0,00166	0,00278
Kestirim	-0,01172	-0,00267	-0,00506	-0,00168	0,00275
% Hata	-1,02	-1,28	-1,48	-1,28	1,01
	Nd	Yvu	Nvu	Yru	Nru
Gerçek	-0,00139	-0,0116	-0,00264	-0,00499	-0,00166
Kestirim	-0,0014	-0,01169	-0,00269	-0,00505	-0,0017
% Hata	-0,54	-0,75	-1,87	-1,23	-2,15
	Yud	Nud	Yuud	Nuud	Yvvv
Gerçek	0,00556	-0,00278	0,00278	-0,00139	-0,08078
Kestirim	0,00555	-0,0028	0,0028	-0,00144	-0,07499
% Hata	0,26	-0,68	-0,57	-3,84	7,16
	Nvvv	Yvvr	Nvvr	Yvvd	Nvvd
Gerçek	0,01636	0,15356	-0,05483	0,0119	-0,00489
Kestirim	0,01872	0,15735	-0,05328	0,01304	-0,00446
% Hata	-14,44	-2,46	2,82	-9,56	8,73
	Yvdd	Nvdd	Yddd	Nddd	
Gerçek	-0,00004	0,00013	-0,0009	0,00045	
Kestirim	-0,00004	0,00013	-0,00088	0,00045	
% Hata	-10,99	-0,52	1,67	-0,64	

Çizelge 3.14 : Senaryo 3 - Doğrulama koşumu giriş işareti.

Başlangıç Zamanı	Giriş İşareti
0. saniye	+10 derece
50. saniye	-10 derece
100. saniye	+20 derece
150. saniye	-20 derece
200. saniye	+30 derece
250. saniye	-30 derece



Şekil 3.9 : Senaryo 3 - Doğrulama koşumu.



Şekil 3.10 : Senaryo 3 - Korelasyon analiz sonuçları.

Senaryo 3 sonuçları

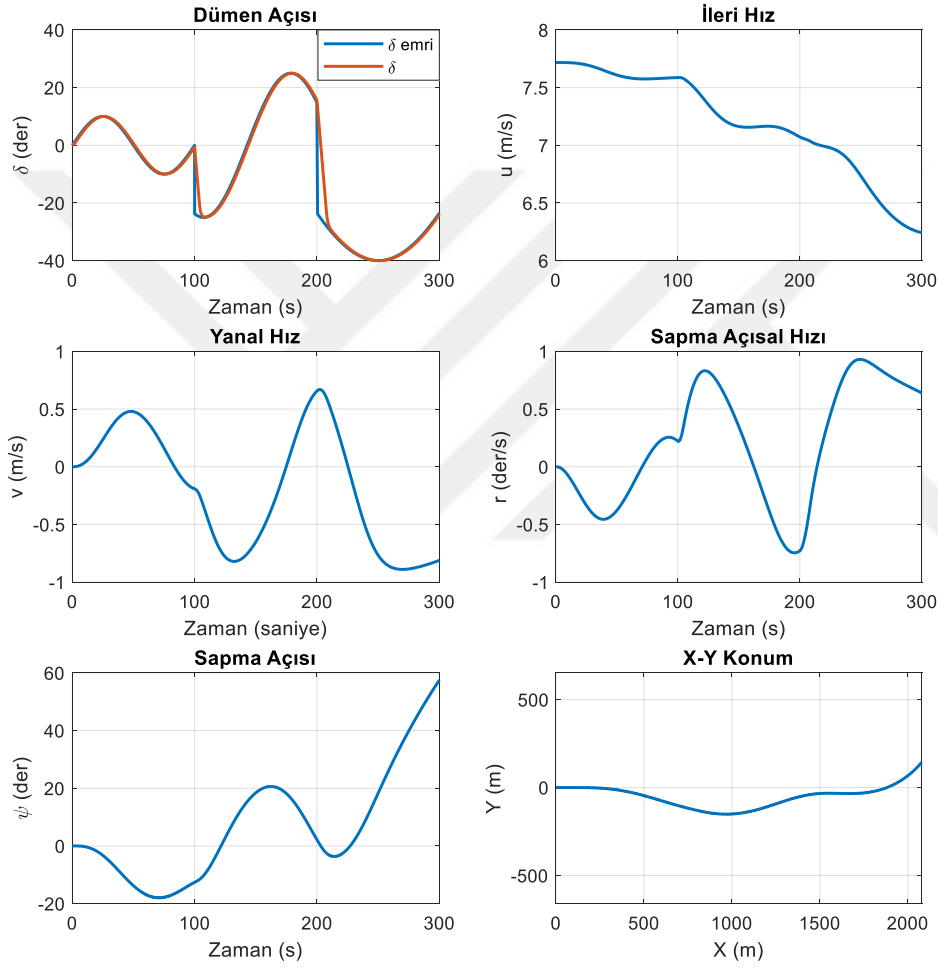
Senaryo 3 için kestirim koşumu giriş işareti Çizelge 3.11’de, kestirim koşumu Şekil 3.8’de verilmiştir. Kestirim koşulunda 40 derece ve 5 derece dümen açıları için zigzag manevrası yapılmıştır. Çizelge 3.12 ve Çizelge 3.13’te parametre kestirim sonuçları görülmektedir. Bu senaryoda Senaryo 2’deki kestirim hatalarına yakın değerlerde sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 3.14’te doğrulama koşumu giriş işareti, Şekil 3.9’da doğrulama koşumu sonuçları görülmektedir. Kestirimde kullanılan 5-40 derece dümen açılarının arasında kalan 10-20-30 derece açılarda basamak giriş işaretleri doğrulama koşulunda kullanılmıştır. Burada geniş açı aralığında yapılan kestirimin, ara açı değerleri için sunacağı doğruluk incelenmek istenmiştir. Şekil 3.9’da gerçek model ve kestirim modeli sonuçlarının yakın sonuçlar aldığı görülmektedir. Senaryo 2’de korelasyon analizi sonuçları için yapılan değerlendirmeler, Senaryo 3’e ait Şekil 3.10’da verilen korelasyon analizi sonuçları için de geçerlidir.

3.3.3.4 Senaryo 4

Çizelge 3.15 : Senaryo 4 - Kestirim koşumu giriş işareti (kesintisiz uyarma mertebesi 69).

Başlangıç Zamanı	İşaret Genliği (A)	İşaret frekansı (f)
0. saniye	10 derece	0.01 1/saniye
100. saniye	25 derece	0.007 1/saniye
200. saniye	40 derece	0.003 1/saniye



Şekil 3.11 : Senaryo 4 - Kestirim koşumu.

Çizelge 3.16 : Senaryo 4 - X kuvvet parametreleri kestirim sonuçları.

	Xu	Xuu	Xuuu	Xvv	Xrv
Gerçek	-0,00184	-0,0011	-0,00215	-0,00899	0,00798
Kestirim	-0,001825	-0,000847	-0,0014402	-0,0089913	0,0079883
% Hata	0,81	22,94	33,01	-0,01	-0,10
	Xrr	Xdv	Xdd	Xuvd	Xudd
Gerçek	0,00018	0,00093	-0,00095	-0,0019	0,00093
Kestirim	0,0001838	0,0009286	-0,0009467	0,0008606	-0,0018503
% Hata	-2,08	0,15	0,35	145,29	298,95

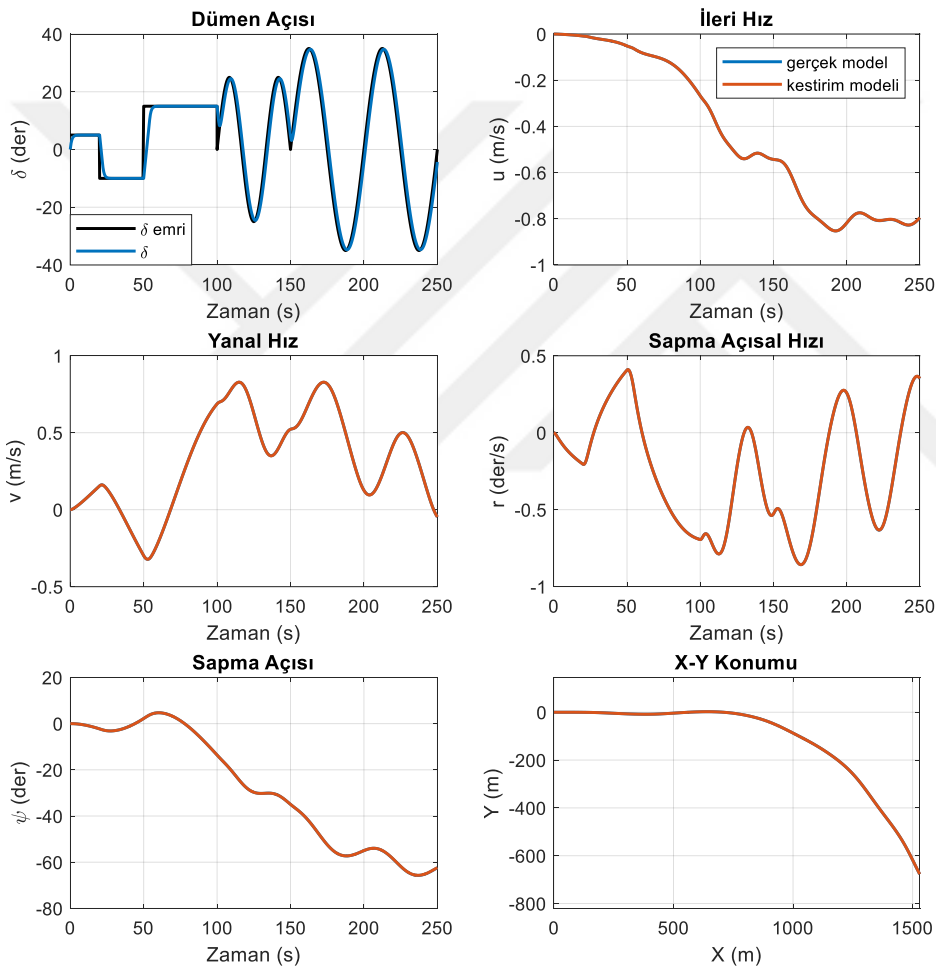
Çizelge 3.17 : Senaryo 4 - Y kuvveti ve N momenti parametreleri kestirim sonuçları.

	Yv	Nv	Yr	Nr	Yd
Gerçek	-0,0116	-0,00264	-0,00499	-0,00166	0,00278
Kestirim	-0,01154	-0,00264	-0,00496	-0,00166	0,00278
% Hata	0,51	0,11	0,607	0,24	-0,13
	Nd	Yvu	Nvu	Yru	Nru
Gerçek	-0,00139	-0,0116	-0,00264	-0,00499	-0,00166
Kestirim	-0,00139	-0,01125	-0,00283	-0,00453	-0,00174
% Hata	0,11	3,03	-7,16	9,19	-4,59
	Yud	Nud	Yuud	Nuud	Yvvv
Gerçek	0,00556	-0,00278	0,00278	-0,00139	-0,08078
Kestirim	0,00557	-0,00278	0,00172	-0,00143	-0,07684
% Hata	-0,16	-0,108	38,24	-2,66	4,87
	Nvvv	Yvvr	Nvvr	Yvvd	Nvvd
Gerçek	0,01636	0,15356	-0,05483	0,0119	-0,00489
Kestirim	0,01486	0,15764	-0,05561	0,01468	-0,00503
% Hata	9,16	-2,65	-1,42	-23,32	-2,83
	Yvdd	Nvdd	Yddd	Nddd	
Gerçek	-0,00004	0,00013	-0,0009	0,00045	
Kestirim	-0,00027	0,00012	-0,0009	0,00045	
% Hata	-571,39	7,22	0,305	-1,01	

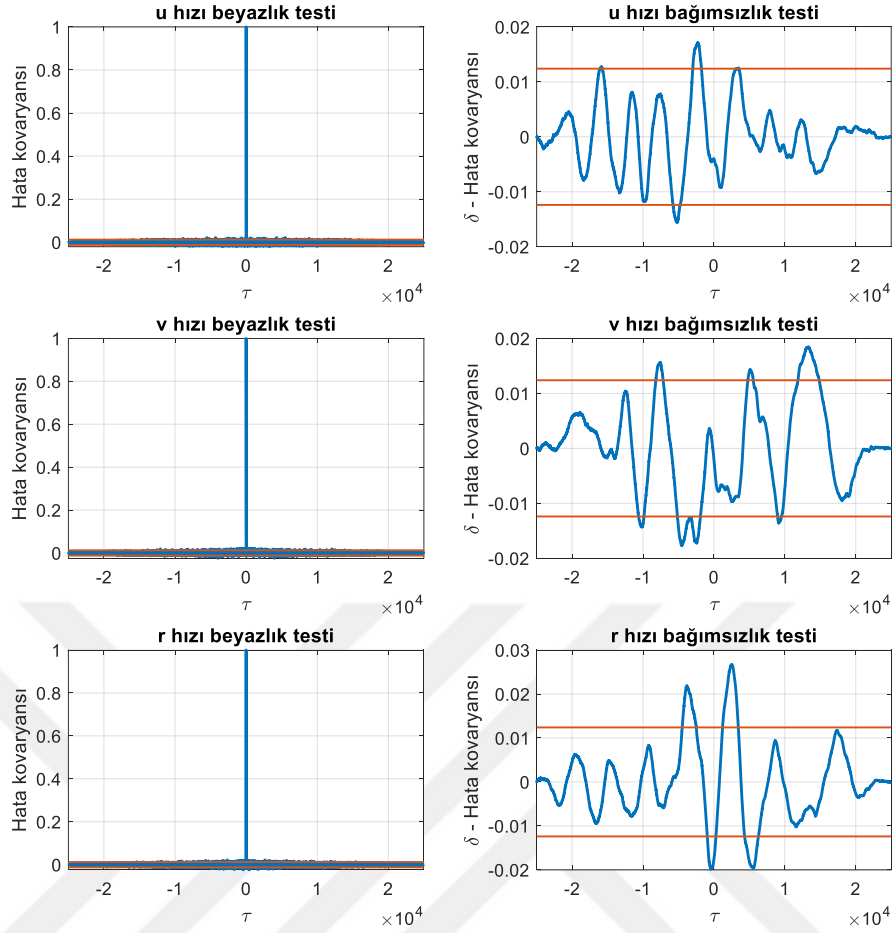
Çizelge 3.18 : Senaryo 4 - Doğrulama koşumu giriş işareti.

Başlangıç Zamanı	Giriş işareti
0. saniye	+5 derece
20. saniye	-10 derece
50. saniye	+15 derece

Başlangıç Zamanı	İşaret Genliği (A)	İşaret frekansı (f)
100. saniye	25 derece	0.03 1/saniye
200. saniye	40 derece	0.02 1/saniye



Şekil 3.12 : Senaryo 4 : Doğrulama koşumu.



Şekil 3.13 : Senaryo 4 - Korelasyon analiz sonuçları.

Senaryo 4 sonuçları

Senaryo 4 için kestirim koşumu giriş işareti Çizelge 3.15'te, kestirim koşumu Şekil 3.11'de verilmiştir. Bu koşulda giriş işareti olarak farklı genlik ve frekanslarda sinüs işaretleri uygulanmıştır. Çizelge 3.16 ve Çizelge 3.17'de parametre kestirim sonuçları verilmiştir. Senaryo 4'teki ileri hıza bağlı katsayıların hata oranlarının Senaryo 2'ye nispeten yüksek olduğu görülmüştür. Senaryo 2'nin kestirim koşulunda ileri hızdaki değişim Senaryo 4'tekine göre daha fazladır. Bu da ileri hıza bağlı katsayıların kestirim doğruluğunu artırmıştır.

Çizelge 3.18'de doğrulama koşumu giriş işareti, Şekil 3.12'de doğrulama koşumu verilmiştir. Bu koşulda kullanılan giriş hem basamak hem de sinüs yapısında işaretler içermektedir. Kullanılan sinüs işaretler, kestirim adımıdaki sinüs işaretler ile aynı genlikte farklı frekanslardadır. Senaryo 2'de korelasyon analizi sonuçları için yapılan değerlendirmeler, Senaryo 4'e ait Şekil 3.13'te verilen korelasyon analizi sonuçları için de geçerlidir.



4. MANEVRA MODELİ İÇİN KONTROLÖR TASARIMI

Bu bölümde mariner gemisi için sapma açısının kontrolü problemi ele alınmıştır.

Gemi manevrasına yönelik kontrol çalışmalarında kontrol problemini basitleştirmek ve gemi kontrol sisteminin karmaşıklığını azaltmak için sapma açısının ve geminin sürat kontrolleri ayrı ayrı gerçekleştirilmektedir. Ayrıştırmaya gidildiği durumda; sapma açısı kontrolü için yanal hız ve sapma hızı bağlı durumlar olarak dikkate alınırken ileri hız ise gemi hızı kontrolünde ayrı olarak ele alınmaktadır.

Bu tez çalışmasında sistemin optimal kontrolü SDRE yöntemi ile yapılmıştır. SDRE yöntemi için kullanılan sistem modeli Bölüm 4.2.1’de verilmiştir. Sayısal çözümlerde; SDRE kontrolör tasarımı için sistem modelinde yer alan modelin bilinmeyen parametreleri için, parametre kestirimi çalışmalarında elde edilen değerler kullanılmıştır.

SDRE’de kullanılan durumlar; yanal hız, sapmanın açısal hızı ve sapma açısıdır. Gemi modelinden alınan hız ölçümleri bir KF ile filtrelenerek durumların yerine yazılmaktadır. Ölçümleri filtrelemek için tasarlanan KF’de, modelin bilinmeyen parametrelerin yerine SAEKF ile kestirilmiş değerleri kullanılmıştır. SDRE ile elde edilen kontrolörde hızlara ilişkin durumlar yerine filtrelenmiş hız ölçümleri kullanılmıştır. Sapma açısı ölçüm gürültüsünün standart sapması 0.01 derecedir.

4.1 Kontrol Yöntemi

SDRE yöntemi kontrol camiasında yeni sayılabilecek kontrol yöntemlerinden biridir. Doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünde esnek bir tasarım yapısına sahip olması sebebiyle son 20 yılda, literatürde, tanınan yöntemler arasında yerini almıştır.

SDRE yöntemi “genişletilmiş doğrusallaştırma (extended linearization)” şeklinde ifade edilen; doğrusal olmayan sistemlerin modelinin durumlara bağlı katsayılar (State Dependent Coefficient-SDC) ile, doğrusal durum uzay modeline benzer bir biçimde temsil edilmesi fikrine dayanır. Bu sayede doğrusallaştırmalar ile kaybolan doğrusal olmayan etkiler, modelde tutulmuş olur. Sistemin SDRE’ye uygun durum

uzay modeli tek değildir, sonsuz sayıda gösterilim mevcuttur. Bu nedenle, sistemin sahip olduğu doğrusal olmayan ilişkilere bağlı olarak birden fazla durum uzay model tasarımı elde edilebilir.

SDRE temelli kontrol yöntemi, doğrusal olmayan sistemlerin kısıtsız sonsuz ufuklu karesel optimal problemleri için geliştirilmiş bir yöntemdir, [26]. Yöntem, sonlu zamanda çözüm elde edilmesi gereken problemler için tasarlanmış olmasa da yerleşme zamanı yeterince uzun sistemler için başarılı sonuçlar vermektedir. Yöntemin, Riccati denklemini çözümüne dayanması sebebiyle sayısal çözüme sahip oluşu gerçek zamanlı uygulamalarda kullanımı da mümkün kılmaktadır.

4.1.1 SDRE temelli tasarım yöntemi için sistem denklemleri

SDRE kontrol tasarımında kullanılacak sistem modeli Denklem 4.1-4.3'te verilmiştir, [26].

Doğrusal olmayan sistem, Denklem 4.1'de verilen “duruma bağlı katsayı (state dependent coefficient, SDC)” yapısına getirilir.

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A(x)x(t) + B(x)u(t) \\ y(t) &= C(x)x(t)\end{aligned}\quad (4.1)$$

Denklem 3.1'de içerisinde durumların katsayı olarak yer aldığı $A(x)$ durum matrisi, $B(x)$ kontrol giriş matrisi, $C(x)$ sistem çıktısı matrisidir.

Model matrisleri bir $x(0) = x_0$ başlangıç durumundan itibaren her örneklem için anlık olarak hesaplanır. Denklem 4.2 ile verilen Riccati denklemini, $P \geq 0$ olması şartı ile optimal çözümü sunan P 'yi bulmak için çözülür.

$$C(x)^T Q C(x) + P A(x) + A^T(x) P - P B(x) R^{-1} B^T P = 0 \quad (4.2)$$

Uygun bir P değeri bulunduktan sonra hesaplanacak olan durum geri besleme kazancı K ve kontrol işareti u_c Denklem 4.3'te verilmiştir.

$$\begin{aligned}K &= R^{-1} B(x)^T P \\ s(x) &= -((A(x) - B(x)K)^T)^{-1} C(x)^T Q z(t) \\ u_c(x) &= -Kx(t) - s(x)\end{aligned}\quad (4.3)$$

Denklem 4.3'te $z(t)$ referans girişi ifade etmektedir. u_c kontrol işaretinin hesaplanması ile kontrol için anlık optimal kontrol işareti bulunmuş olur.

4.1.2 SDRE temelli tasarım yönteminin manevra modeline uyarlanması

Bu bölümde, Bölüm 4.2.1'de genel yapısı verilen SDRE yönteminin mariner manevra sisteminin sapma açısı kontrolü için uyarlanması anlatılmaktadır.

Denklem 2.11 ve 2.12'de verilen mariner manevra modelinin tekil çözümü olmayan SDC yapısına getirilmiş hali Denklem 4.4'te verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = A(v, r) \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + B(v, r)\delta$$

$$c_{vY} = 0,402582, c_{vN} = 0,0436535, c_{rY} = 0,000693214, c_{rN} = 0,046596$$

$$A_{11} = (c_{vY}Y_v + c_{vN}N_v) + (c_{vY}Y_{vu} + c_{vN}N_{vu})\Delta u + (c_{vY}Y_{vvv} + c_{vN}N_{vvv})v^2$$

$$A_{12} = (c_{vY}Y_r + c_{vN}N_r) + (c_{vY}Y_{ru} + c_{vN}N_{ru})\Delta u + (c_{vY}Y_{vvr} + c_{vN}N_{vvr})v^2$$

$$A_{21} = (c_{rY}Y_v + c_{rN}N_v) + (c_{rY}Y_{vu} + c_{rN}N_{vu})\Delta u + (c_{rY}Y_{vvv} + c_{rN}N_{vvv})v^2$$

$$A_{22} = (c_{rY}Y_r + c_{rN}N_r) + (c_{rY}Y_{ru} + c_{rN}N_{ru})\Delta u + (c_{rY}Y_{vvr} + c_{rN}N_{vvr})v^2 \quad (4.4)$$

$$A(v, r) = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_{11} = (c_{vY}Y_\delta + c_{vN}N_\delta) + (c_{vY}Y_{u\delta} + c_{vN}N_{u\delta})\Delta u + (c_{vY}Y_{uu\delta} + c_{vN}N_{uu\delta})\Delta u^2 \\ + (c_{vY}Y_{vv\delta} + c_{vN}N_{vv\delta})v^2 + (c_{vY}Y_{v\delta\delta} + c_{vN}N_{v\delta\delta})v\delta + (c_{vY}Y_{\delta\delta\delta} + c_{vN}N_{\delta\delta\delta})\delta^2$$

$$B_{21} = (c_{rY}Y_\delta + c_{rN}N_\delta) + (c_{rY}Y_{u\delta} + c_{rN}N_{u\delta})\Delta u + (c_{rY}Y_{uu\delta} + c_{rN}N_{uu\delta})\Delta u^2 \\ + (c_{rY}Y_{vv\delta} + c_{rN}N_{vv\delta})v^2 + (c_{rY}Y_{v\delta\delta} + c_{rN}N_{v\delta\delta})v\delta + (c_{rY}Y_{\delta\delta\delta} + c_{rN}N_{\delta\delta\delta})\delta^2$$

$$B(v, r) = [B_{11} \quad B_{21} \quad 0]'$$

$$C = [0 \quad 0 \quad 1]$$

Denklem 4.4'te modele ait tüm bilinenler c_{vY} , c_{vN} , c_{rY} ve c_{rN} katsayılarına indirgenmiştir. Sapma açısı kontrolü için durum ayrıştırılmasına gidildiğinden ileri hız terimi durum vektöründen çıkarılmış ve katsayı olarak durum matrisine yazılmıştır.

Denklem 4.4'te manevra modeli için kurulan SDC model yapısı verilmiştir. Denklem 4.4'te verilen model Denklem 4.3'te yerine yerleştirildiğinde manevra modeli özelindeki SDRE temelli kontrolör tasarımı tamamlanmış olur.

4.2 Kontrol Testleri

Bu bölümde tasarlanan kontrolörün performansını incelemek amacıyla yapılan sapma açısı basamak referansı testleri ile rota takibi testlerine ait sonuçlar verilmiştir. SDRE kontrolörü kontrol işaretinin ağırlık katsayısı olan R matrisinin farklı değerleri için incelemeler yapılmıştır. R 'nin küçük değerleri için kontrol işaretinin 40 derecelik dümen açısı sınırının üstüne çıktığı görülmüştür. Kontrol işareti doyuma ulaştığı için R 'nin küçük değerleri için sistem yanıtında aşımalarla karşılaşmaktadır. Aynı açı emri ve farklı R değerleri için geçici hal ve sürekli hal yanıtları arasındaki farklılıklar Senaryo 1 ve Senaryo 2'nin sonuçlarında görülmektedir.

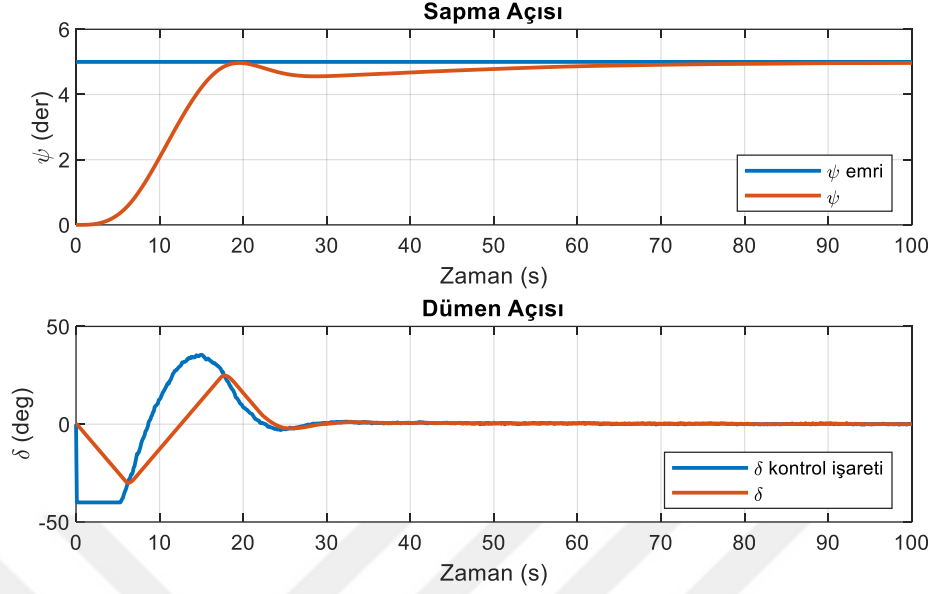
Senaryo 1'de R değeri 0,005 ve diğer tüm senaryolarda R değeri 0,01 seçilmiştir.

Geribesleme durum ağırlıklarının atandığı Q matrisi tüm senaryolarda $\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ olarak seçilmiştir.

Senaryo 1, Senaryo 2 ve Senaryo 3'te sabit açılarda giriş işaretleri uygulanmıştır. Senaryo 4'te basamak giriş şeklinde farklı açılar içeren giriş işareti kullanılmıştır. Senaryo 5 ve Senaryo 6 ise kartezyen düzlemde belirlenen konum hedeflerine ulaşmak için yapılan rota takibi testlerini içermektedir.

Şekil 4.1-Şekil 4.8'de ψ gemi sapma açısını, " ψ emri" emredilen sapma açısını, δ gemi dümenini, " δ kontrol işareti" kontrolör çıkış işaretini ifade etmektedir.

4.2.1 Senaryo 1



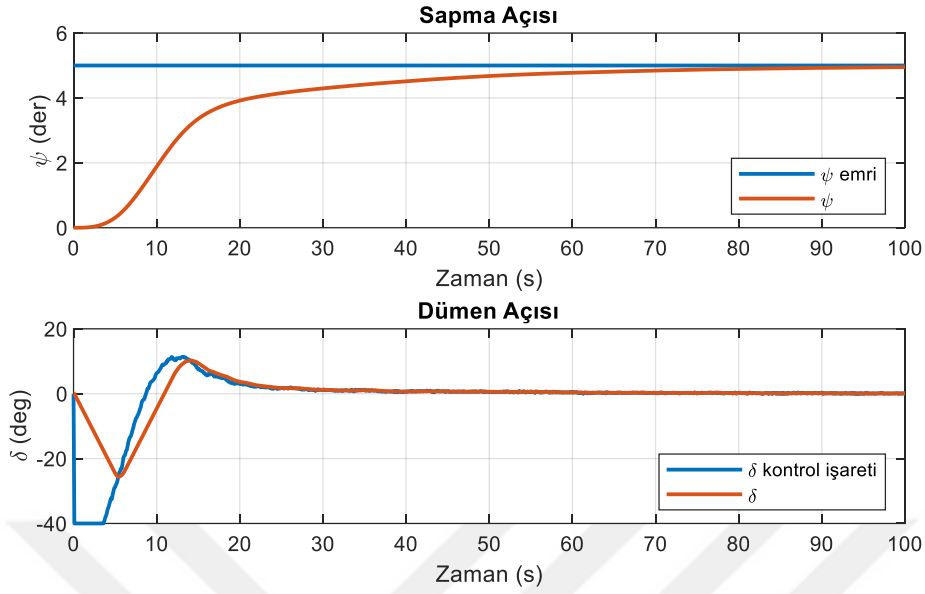
Şekil 4.1 : Senaryo 1 – Sabit sapma açısı emri.

Senaryo 1’de en kısa sürede emredilen açığa gemiyi ulaştırarak fakat aşımaya sebebiyet vermeyecek kontrolör tasarlanmaya çalışılmıştır. Tasarım şartları doğrultusunda Senaryo 1 için kontrol işareti ağırlığı (R) 0,005 olarak belirlenmiştir.

Şekil 4.1’de Senaryo 1 ait sonuçlar görülmektedir. Senaryo boyunca sapma açısı emri sabit 5 derecedir. Senaryoda 0-10. saniyeler arasında 40 derecelik kontrol işareti ile emredilen sapma açısına dönülmektedir. Sapma açısı ile emredilen sapma açısı arasındaki farkın azaldığı 10-20. saniyeler arasında kontrolörün gemiyi dengelemek için ters işaretli ve doyum sınırına yakın derecede dümen açısı oluşturduğu görülmektedir.

Gemi dümeninin dönüş hızı 5 derece/saniye ile sınırlıdır. Kontrol işaretinin kısa zamanda gerçekleşen yüksek genlikli değişimlerine, gemi dümeni hız sınırı sebebiyle yetişememektedir. Dümenin kontrol işaretine tepkisi yavaş kaldığından, emredilen açığa gemi yaklaşık 20. saniyede ulaşmasına rağmen 50. saniyede sürekli hale ulaşabilmiştir.

4.2.2 Senaryo 2



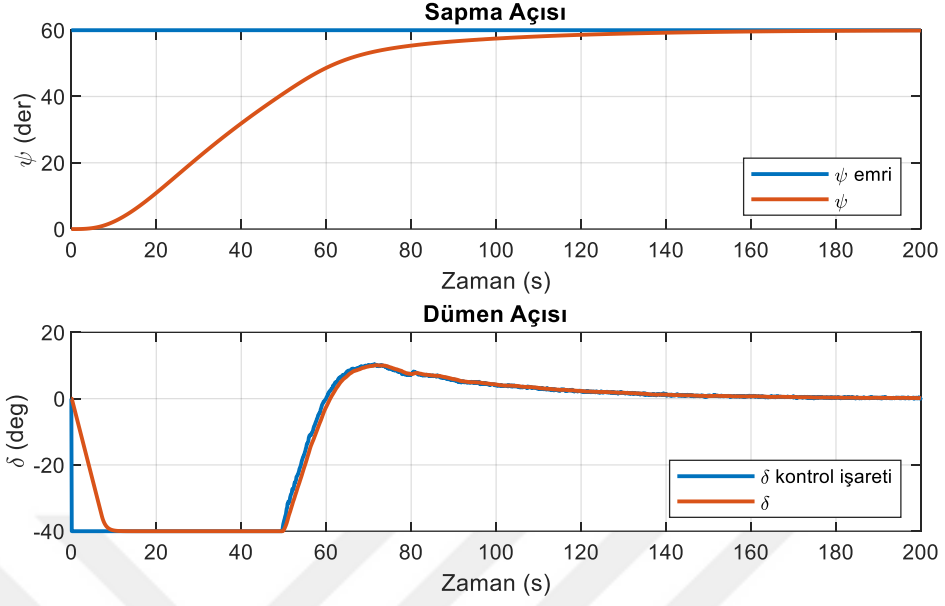
Şekil 4.2 : Senaryo 2 – Sabit sapma açısı emri.

Senaryo 2’de dümen dönüş hızı sınırı göz önünde bulundurularak R değeri 0,01 seçilmiştir. Senaryo 1’de uygulanan 5 derecelik sapma açısı emri Senaryo 2’de de uygulanmıştır. Senaryo 2’ye ait sonuçlar Şekil 4.2’de görülmektedir.

Dümen açısı grafiğinde 10-20. saniyeler arası incelendiğinde, emredilen açı ile gemi sapma açısı farkının azaldığı bu zaman diliminde, kontrol işaretinin Senaryo 1’e göre doyum bölgesinden daha küçük değerler aldığı görülmektedir. Ayrıca kontrol işaretindeki hızlı ve yüksek genlikli değişimlerin önüne geçildiği; dümenin, üretilen kontrol işaretini Senaryo 1’e göre daha iyi takip ettiği görülmektedir.

Senaryo 1 ve Senaryo 2 sonuçları incelendiğinde sapma açısının yerleşme zamanının iki senaryo için yaklaşık olduğu görülmektedir. Fakat R değeri 0,01 seçildiği durumda, emredilen sapma açısına ulaşıldıktan sonra Senaryo 1’de görülen bozulma ile Senaryo 2’de karşılaşmamıştır.

4.2.3 Senaryo 3



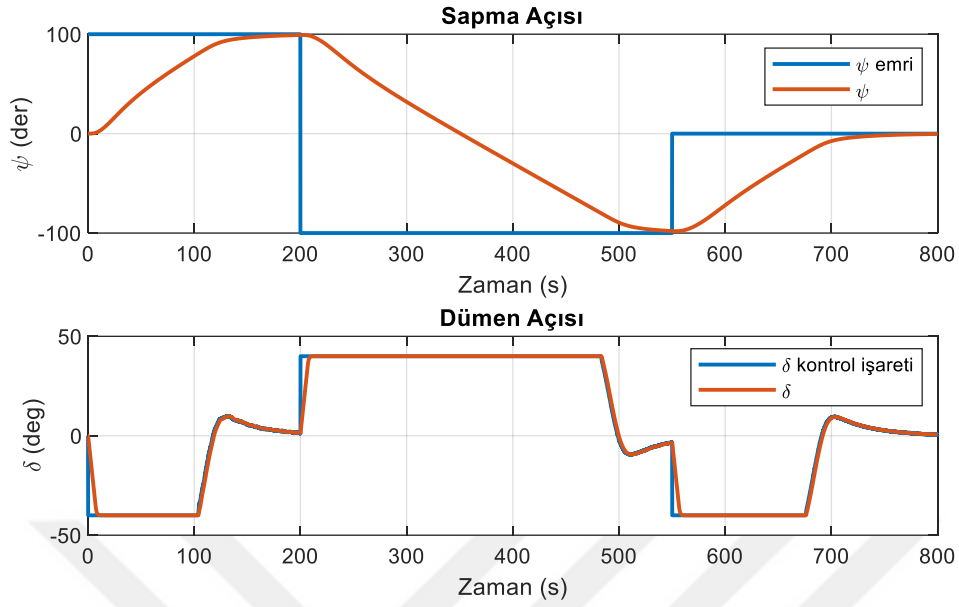
Şekil 4.3 : Senaryo 3 – Sabit sapma açısı emri.

Senaryo 2’de küçük açı emri altında kontrolör performansı incelenmişti. Senaryo 3’te sapma açısı emri artırılarak 60 dereceye çıkarılmıştır. Şekil 4.3’te Senaryo 3’e ait sonuçlar görülmektedir.

Dümen açısı grafiğinde dümenin 40 derecelik sınır değerine ulaştığı ve daha sonra 50. saniyede kontrol işaretinin değişimini takip edecek şekilde azaldığı görülmektedir. Seçilen R değerinin, dümen dinamiğine uygun olduğu bu senaryoda daha net bir şekilde görülmüştür.

Senaryo 2’de büyük açı değerli bir emre karşılık aşım yapılmadan emredilen açıya ulaşıldığı görülmektedir.

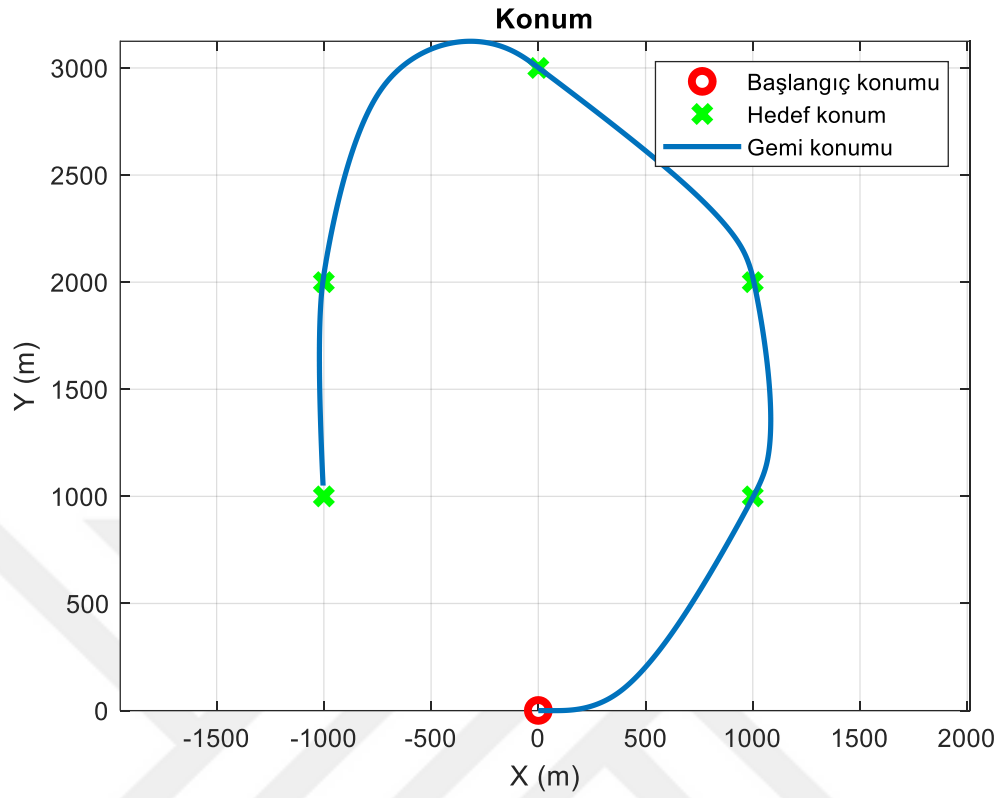
4.2.4 Senaryo 4



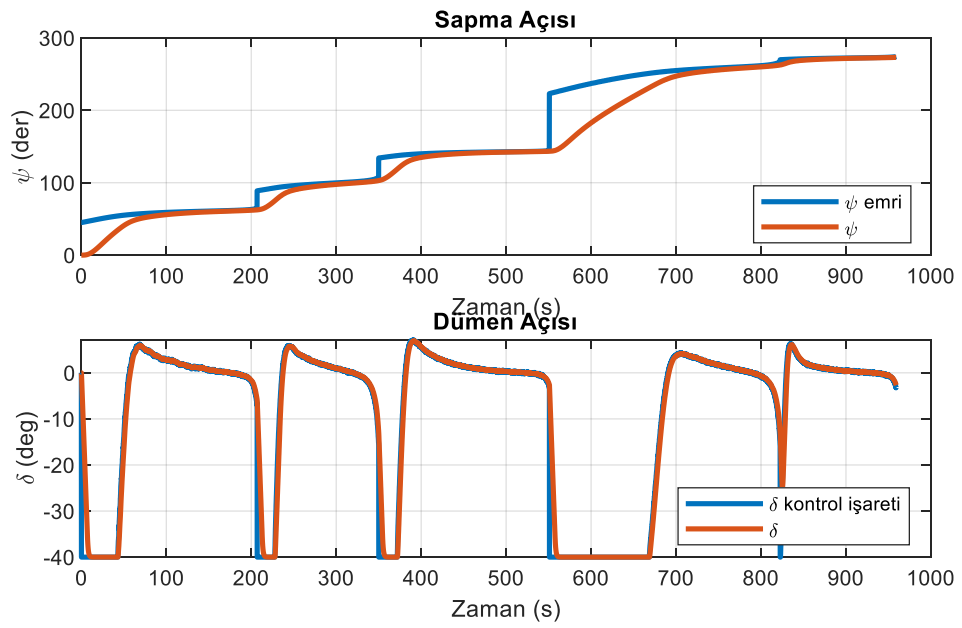
Şekil 4.4 : Senaryo 4 – Farklı sapma açılarında basamak giriş emri.

Senaryo 4'te basamak giriş şeklinde farklı değerlerde sapma açısı emirleri uygulanmıştır. Bu senaryoda geminin zıt yönlü ve büyük açı değerli emirler altında hareketi incelenmiştir. Şekil 4.4'te Senaryo 4'e ait sonuçlar verilmiştir. Sapma açısı grafiği incelendiğinde geminin uygulanan emirlere aşım yapmadan yerleştiği görülmektedir.

4.2.5 Senaryo 5

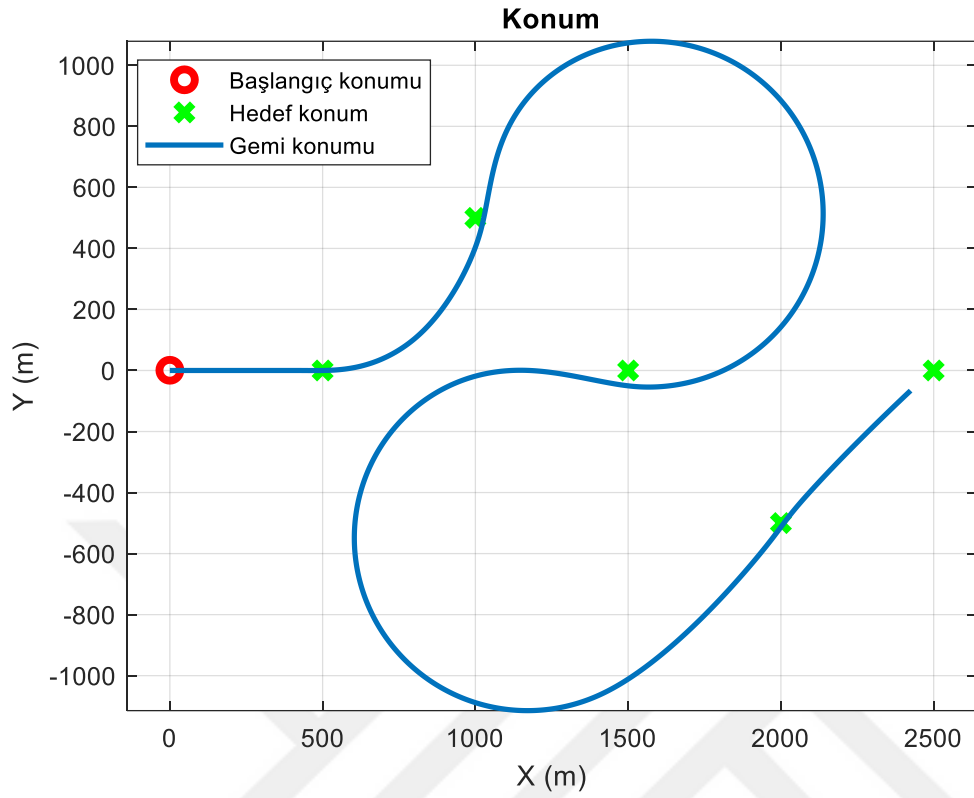


Şekil 4.5 : Senaryo 5 – Rota takibi, konum hedefleri.

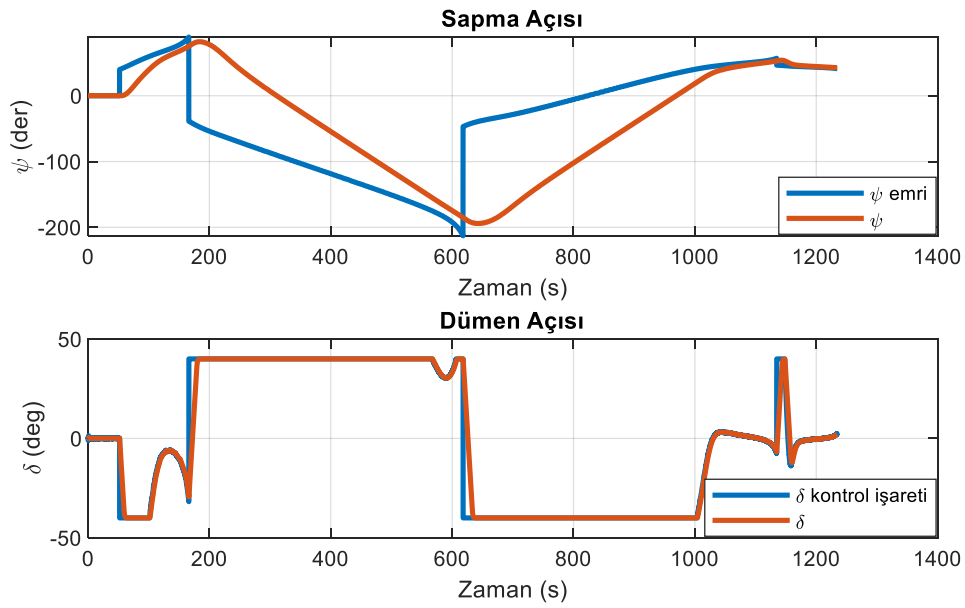


Şekil 4.6 : Senaryo 5 - Rota takibi, sapma ve dümen açıları.

4.2.6 Senaryo 6



Şekil 4.7 : Senaryo 6 - Rota takibi, konum hedefleri.



Şekil 4.8 : Senaryo 6 - Rota takibi, sapma ve dümen açıları.

Senaryo 5 ve Senaryo 6'da dünya eksenini üzerinde noktasal $X - Y$ koordinatı şeklinde hedef konumlar belirlenmiştir. Gemi ile sıradaki hedef arasındaki açı farkına bağlı olarak gemiye anlık sapma açısı emri uygulanmıştır. Noktasal hedeflere gemi uzunluğunun yarısı kadar ($\sim 100\text{m}$) mesafe kalındığında hedefe ulaşılmış kabul edilerek bir sonraki hedefe yönelinmektedir. Senaryo 5'e ait sonuçlar Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da; Senaryo 6'ya ait sonuçlar Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de verilmiştir.

Şekil 4.5'te Senaryo 5'e ait hedef konumlar ve geminin $X - Y$ kartezyen düzlemindeki hareketi görülmektedir. Açı emrinin kademeli olarak artacağı ve geminin sapma açısı emrine yetişebileceği bir senaryo kurgusu oluşturacak şekilde hedef konumlar belirlenmiştir. Şekil 4.6'da Senaryo 5'e ait sapma açısı ve dümen açısı grafikleri verilmiştir. Geminin kontrol işareti ile uygulanan sapma açısına aşırımsız bir şekilde eriştiği ve hedef konumlara ulaştığı görülmektedir.

Şekil 4.7'de Senaryo 5'e ait hedef konumlar ile geminin $X - Y$ kartezyen düzlemindeki hareketi; Şekil 4.8'de sapma açısı ve dümen açısı grafikleri görülmektedir. Bu senaryoda, geminin tam dümen açısında uzun süreli dönüşler gerçekleştirmesini sağlayacak şekilde hedef konumlar belirlenmiştir. Geminin kontrol işareti ile emredilen sapma açısına ulaşacak şekilde hareket ederek hedef konumlara ulaştığı görülmektedir.



5. SONUÇ

Simülasyon ortamında çalışmaları gerçekleştirebilmek için mariner gemisi manevra dinamik modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan manevra modelindeki hidrodinamik katsayıların kestirimi için model bilinenlerine-bilinmeyenlerine yönelik kabuller yapılmış ve kestirilecek katsayılar belirlenmiştir. Katsayıların kestirimi için SAEKF yöntemi seçilmiştir. SAEKF yöntemi sistem denklemleri mariner gemisi manevra modeli için özelleştirilmiş ve SAEKF durum uzay modeli oluşturulmuştur.

Kestirim çalışmalarını gerçekleştirebilmek için simülasyon ortamında mariner gemi modelinden çizgisel ve açısız gövde eksen takımına ait hız verileri toplanmıştır. Toplanan gerçek değerli verilere belirli varyanslarda beyaz gürültüler eklenerek hız ölçümleri elde edilmiştir. SAEKF yönteminde buradan elde edilen hız ölçümleri kullanılarak kestirim yapılmıştır.

Kestirimler gerçekleştirildikten sonra kestirilen katsayılar ile bir kestirim modeli oluşturulmuştur. Kestirilmiş model ve gerçek model kullanılarak doğrulama koşulları gerçekleştirilmiştir. Doğrulama koşullarında, kestirim adımlarından farklı dümen işaretleri ile uyarılan modellerden hız ölçümleri toplanmıştır. Doğrulama testleri olan korelasyon testlerinden bağımsızlık ve beyazlık testleri gerçekleştirilmiştir.

Başarısız bir kestirim gerçekleştirilmesi durumunda karşılaşılabilecek analiz sonuçlarını görmek amacıyla Senaryo 1 başlığıyla verilen başarısız sonuçlanan kestirim senaryosu oluşturulmuştur. Senaryo 1 sonuçları sonrasındaki senaryolar için bir referans teşkil etmektedir. Senaryo 2-3-4'te farklı genlikte, frekansta ve dalga tipinde dümen girişleri ile mariner gemisi geniş bir çalışma aralığında uyarılmıştır. Senaryo 2-3-4 doğrulama testleri sonuçları incelendiğinde kestirimlerin yeterli başarı düzeyine sahip oldukları görülmüştür. Senaryo 2 kestirim sonuçları kontrolör tasarımında kullanılmak üzere seçilmiş ardından sapma açısı kontrolörünün tasarımı çalışmalarına geçilmiştir.

Sapma açısı kontrolü SDRE temelli kontrol yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. SDRE yönteminin genelleştirilmiş denklemleri mariner manevra modeli için uyarlanmıştır. Sapma açısı kontrolü için durum matrisi ve kontrol matrisi oluşturulduktan sonra kontrol işareti ağırlığını belirleyen R katsayısı için uygun bir değer belirlenmiştir. R katsayısı belirlenirken, sapma açısı için kontrol yüzeyi olan dümenin fiziksel sınırları göz önünde bulundurulmuştur.

Kapalı çevrimin tamamlanması için beyaz gürültü içeren hız ölçümleri filtrelenerek sisteme geribeslemesi yapılmıştır. Hız ölçümlerini filtrelemek için SAEKF kestirim modelinde yer alan model bilinmeyenlerine Senaryo 2’de bulunan kestirim değerleri yazılmış ve bir KF tasarlanmıştır.

Tasarlanan SDRE temelli kontrolör performansını incelemek amacıyla, aç emri ve rota takibi senaryoları ile kontrol testleri gerçekleştirilmiştir. Her iki senaryo türü için geminin, sapma açısı emrini aşırımsız takip ettiği ve sürekli halde emredilen açığa yerleştiği görülmüştür.

6. KAYNAKLAR

- [1] **Wang, X., Zou, Z. and Yin, J.** (2013). Modular parameter identification for ship maneuvering prediction based on support vector machines, *Proceedings of the Twenty-Third International Offshore and Polar Engineering*, (pp. 834-839).
- [2] **Shi, C.** (2006). Collaboration to enhance development and application of shiphandling simulators. *International symposium on GPS/GNSS*, 12, (pp. 459-464).
- [3] **Abkowitz, M. A.** (1980). Measurement of Hydrodynamic Characteristics from Ship Maneuvering Trials by System Identification. *SNAME Transactions*, Vol. 88, (pp. 283-318).
- [4] **A. Ogawa and H. Kasai.** (1978). On the mathematical model of manoeuvring motion of ships, *International Shipbuilding Progress*, Vol. 25, no. 292, (pp. 306–319).
- [5] **K. Nomoto, T. Tagushi, K. Honda, and S. Hirano.** (1957). On steering qualities of ships, *International Shipbuilding Progress*, Vol. 4, no. 35, (pp. 354–370).
- [6] **Fossen, T. I.** (2011). *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*. John Wiley & Sons.
- [7] **Ross, A.** (2008). *Nonlinear manoeuvring models for ships: a Lagrangian approach*. (Doktora tezi). Department of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology.
- [8] **The Maneuvering Committee of ITTC.** (2008) Final report and recommendations to the 25th ITTC, *Proceedings of the 25th International Towing Tank Conference*, (pp. 143–208).
- [9] **Man Zhu, Axel Hahn, Yuanqiao Wen.** (2017). Parameter identification of ship maneuvering models using recursive least square method based on support vector machines, *TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*.
- [10] **S. Hajizadeh, M.S. Seif, H. Mehdigholi.** (2016). Determination of ship maneuvering hydrodynamic coefficients using system identification technique based on free-running model test, *Science Iranica*, Vol. 23, (pp. 2154-2165).
- [11] **C. Shi, D. Zhao, J. Peng, C. Shen.** (2009). Identification of Ship Maneuvering Model Using Extended Kalman Filters, *TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Volume 3, Number 1.

- [12] **C. G. Kallström and K. J. Aström.** (1981). Experiences of system identification applied to ship steering, *Automatica*, vol. 17, no. 1, (pp. 187–198).
- [13] **W.W. Zhou and M. Blanke.** (1989) Identification of a class of nonlinear state-space models using RPE techniques, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 34, no. 3, (pp. 312–316).
- [14] **R. P. Selvam, S. K. Bhattacharyya, and M. Haddara.** (2005) A frequency domain system identification method for linear ship maneuvering, *International Shipbuilding Progress*, Vol. 52, no. 1, (pp. 5–27).
- [15] **Y. Chen, Y. Song, and M. Chen.** (2010) Parameters identification for ship motion model based on particle swarm optimization, *Kybernetes*, vol. 39, no. 6, (pp. 871–880).
- [16] **K. P. Rhee, S. Y. Lee, and Y. J. Sung.** (1998). Estimation of manoeuvring coefficients from PMM test by genetic algorithm, *Proceedings of the International Symposium and Workshop on Force Acting on a Manoeuvring Vessel*, Val de Reuil, Fransa, 1998.
- [17] **W. L. Luo, C. Guedes Soares, and Z. J. Zou.** (2016). Parameter identification of ship maneuvering model based on support vector machines and particle swarm optimization, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vol. 138, No 3.
- [18] **W. Y. Hwang.** (1980). *Application of System Identification to Ship Maneuvering*, (Doktora tezi). MIT.
- [19] **Perera, L. P., Oliveira, P., and Guedes Soares, C.** (2015). System identification of nonlinear vessel steering, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vol. 137, No. 3, (pp. 1–7).
- [20] **Perera, L. P., Oliveira, P., and Guedes Soares, C.** (2016). System identification of vessel steering with unstructured uncertainties by persistent excitation maneuvers, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 41, No. 3, (pp. 515–528).
- [21] **Fossen, T. I., Sagatun, S. I., and Sørensen, A. J.** (1996). Identification of dynamically positioned ships, *Control Engineering Practice*, 4(3), (pp. 369–376).
- [22] **Rhee, K. P. and K. Kim.** (1999). A New Sea Trial Method for Estimating Hydrodynamic Derivatives, *Journal of Ship and Ocean Technology*, Vol. 3, No. 3, (pp. 25-44).
- [23] **Zhang, X. and Z. Zou.** (2011). Identification of Abkowitz Model for Ship Manoeuvring Motion using ϵ -support Vector Regression, *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 23, No.3, (pp. 353-360).
- [24] **Fossen T. I.** *Guidance and Control of Ocean Vehicles*
- [25] **J.D. Pearson.** (1962). Approximation methods in optimal control, *J. Electron Control* 13, (pp. 453-469).

[26] **Tayfun Çimen.** (2009). Development and validation of a mathematical model for control of constrained non-linear oil tanker motion, *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, Vol. 15, Issue 1, (pp. 7-49)

[27] **Torsten Söderström, Petre Stoica.** *System Identification*





7. EKLER

EK A: Mariner manevra modeli için tasarlanan SAEKF durum matrisi ve vektörü



EK A

SAEKF durum matrisi F:

$$F_k(1, 1:37) = [1 \ 0 \ 0 \ m_x \Delta \hat{u}_k \Delta t \ m_x \Delta \hat{u}_k^2 \Delta t \ m_x \Delta \hat{u}_k^3 \Delta t \ m_x \hat{v}_k^2 \Delta t \ m_x \hat{v}_k \hat{r}_k \Delta t \ m_x \hat{r}_k^2 \Delta t \ m_x \hat{v}_k \delta_k \Delta t \ m_x \delta_k^2 \Delta t \ m_x \Delta \hat{u}_k \hat{v}_k \delta_k \Delta t \ m_x \Delta \hat{u}_k \delta_k^2 \Delta t \ 0_{1 \times 24}]$$

$$F_k(2, 1:25) = [0 \ 1 \ 0 \ 0_{1 \times 10} \ m_Y \hat{v}_k \Delta t \ m_{YN} \hat{v}_k \Delta t \ m_Y \hat{r}_k \Delta t \ m_{YN} \hat{r}_k \Delta t \ m_Y \delta_k \Delta t \ m_{YN} \delta_k \Delta t \ m_Y \Delta \hat{u}_k \hat{v}_k \Delta t \ m_{YN} \Delta \hat{u}_k \hat{v}_k \Delta t \ m_Y \Delta \hat{u}_k \hat{r}_k \Delta t \ m_{YN} \Delta \hat{u}_k \hat{r}_k \Delta t \ m_Y \Delta \hat{u}_k \delta_k \Delta t \ m_{YN} \Delta \hat{u}_k \delta_k \Delta t]$$

$$F_k(2, 26:37) = [m_Y \Delta \hat{u}_k^2 \delta_k \Delta t \ m_{YN} \Delta \hat{u}_k^2 \delta_k \Delta t \ m_Y \hat{v}_k^3 \Delta t \ m_{YN} \hat{v}_k^3 \Delta t \ m_Y \hat{v}_k^2 \hat{r}_k \Delta t \ m_{YN} \hat{v}_k^2 \hat{r}_k \Delta t \ m_Y \hat{v}_k^2 \delta_k \Delta t \ m_{YN} \hat{v}_k^2 \delta_k \Delta t \ m_Y \hat{v}_k \delta_k^2 \Delta t \ m_{YN} \hat{v}_k \delta_k^2 \Delta t \ m_Y \delta_k^3 \Delta t \ m_{YN} \delta_k^3 \Delta t]$$

$$F_k(3, 1:25) = [0 \ 0 \ 1 \ 0_{1 \times 10} \ m_{YN} \hat{v}_k \Delta t \ m_N \hat{v}_k \Delta t \ m_{YN} \hat{r}_k \Delta t \ m_N \hat{r}_k \Delta t \ m_{YN} \delta_k \Delta t \ m_N \delta_k \Delta t \ m_{YN} \Delta \hat{u}_k \hat{v}_k \Delta t \ m_N \Delta \hat{u}_k \hat{v}_k \Delta t \ m_{YN} \Delta \hat{u}_k \hat{r}_k \Delta t \ m_N \Delta \hat{u}_k \hat{r}_k \Delta t \ m_{YN} \Delta \hat{u}_k \delta_k \Delta t \ m_N \Delta \hat{u}_k \delta_k \Delta t]$$

$$F_k(3, 26:37) = [m_{YN} \Delta \hat{u}_k^2 \delta_k \Delta t \ m_N \Delta \hat{u}_k^2 \delta_k \Delta t \ m_{YN} \hat{v}_k^3 \Delta t \ m_N \hat{v}_k^3 \Delta t \ m_{YN} \hat{v}_k^2 \hat{r}_k \Delta t \ m_N \hat{v}_k^2 \hat{r}_k \Delta t \ m_{YN} \hat{v}_k^2 \delta_k \Delta t \ m_N \hat{v}_k^2 \delta_k \Delta t \ m_{YN} \hat{v}_k \delta_k^2 \Delta t \ m_N \hat{v}_k \delta_k^2 \Delta t \ m_{YN} \delta_k^3 \Delta t \ m_N \delta_k^3 \Delta t]$$

$$F_k(4:37, 1:37) = [0_{34 \times 3} \ I_{34 \times 34}]$$

SAEKF durum vektörü x:

$$\hat{x}_k(1:13, 1) = [\hat{u}_k \ \hat{v}_k \ \hat{r}_k \ \hat{X}_{u_k} \ \hat{X}_{uu_k} \ \hat{X}_{uuu_k} \ \hat{X}_{vv_k} \ \hat{X}_{rv_k} \ \hat{X}_{rr_k} \ \hat{X}_{v\delta_k} \ \hat{X}_{\delta\delta_k} \ \hat{X}_{uv\delta_k} \ \hat{X}_{u\delta\delta_k}]'$$

$$\hat{x}_k(14:25, 1) = [\hat{Y}_{v_k} \ \hat{N}_{v_k} \ \hat{Y}_{r_k} \ \hat{N}_{r_k} \ \hat{Y}_{\delta_k} \ \hat{N}_{\delta_k} \ \hat{Y}_{vu_k} \ \hat{N}_{vu_k} \ \hat{Y}_{ru_k} \ \hat{N}_{ru_k} \ \hat{Y}_{u\delta_k} \ \hat{N}_{u\delta_k}]'$$

$$\hat{x}_k(26:37, 1) = [\hat{Y}_{uu\delta_k} \ \hat{N}_{uu\delta_k} \ \hat{Y}_{vvv_k} \ \hat{N}_{vvv_k} \ \hat{Y}_{vrv_k} \ \hat{N}_{vrv_k} \ \hat{Y}_{v\delta\delta_k} \ \hat{N}_{v\delta\delta_k} \ \hat{Y}_{v\delta\delta_k} \ \hat{N}_{v\delta\delta_k} \ \hat{Y}_{\delta\delta\delta_k} \ \hat{N}_{\delta\delta\delta_k}]'$$

KİŞİSEL BİLGİLER

Abdullah Tüysüz

EĞİTİM

2013-2018 Lisans Eğitimi: İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) – Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği

2019-2022 Yüksek Lisans Eğitimi: İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) – Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği

İŞ TECRÜBELERİ

07.2018 – 09.2018 Staj, BAYKAR Makina, yazılım birimi

05.2019 - Devam TÜBİTAK, BİLGEM, BTE (Araştırmacı)

PROJELER

Lisans Bitirme Projesi: Quadcopter - Modellemesi, kontrol simülasyonu, sistem inşası, özgün uçuş kontrol yazılımının yazılması ve testler, İTÜ Uçak ve Uzay Fakültesi, Model Tabanlı Tasarım Laboratuvarı.

Kontrol Sistem Tasarım Projesi: Top ve düzlem Dengelemesi – Modellemesi, kontrol simülasyonu, İTÜ Güç ve Hareket Kontrol Lab.

KATILIMLAR

TOK 2018’de bildirinin yazarlığı, (Bildiri başlığı: "Quadcopter modelleme, kontrol and gerçekleştirilmesi").