

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

GEMİ İNŞAATI VE GEMİ MAKİNELERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**GEMİ MANEVRA PERFORMANSININ SİSTEM TEMELLİ YAKLAŞIMLA
BELİRLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Erhan AKSU

**MAYIS 2017
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalında
Erhan AKSU Tarafından hazırlanan**

**GEMİ MANEVRA PERFORMANSININ SİSTEM TEMELLİ YAKLAŞIMLA
BELİRLENMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 25 /04/2017 gün ve 1699 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Ercan KÖSE

Üye : Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU

Üye : Prof. Dr. Gökdeniz NEŞER

Üye : Doç. Dr. İsmail BAYER

Üye : Yrd. Doç. Dr. Betül SARAÇ


.....

.....

.....

.....

.....

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ
Enstitü Müdürü**

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında gemilerin manevra performansının belirlenmesi için sistem temelli simülasyon metodu kullanılarak matematiksel modeller değerlendirilmiştir.

Hazırlamış olduğum doktora tezinde tüm iyi niyetiyle yardımlarını esirgemeyen Sayın hocam Prof. Dr. Ercan KÖSE'ye teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Ayrıca tez çalışmam boyunca desteklerinden ve yardımlarından dolayı, KTÜ Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU'na, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Yrd. Doç. Dr. Betül SARAÇ'a, İTÜ Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Kadir SARIÖZ'e, Yrd. Doç. Dr. İsmail ALTIN'a, Arş. Gör. Dursun SARAL'a, Arş. Gör. Deniz Can KOLUKISA'ya ve KTÜ Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü araştırma görevlilerine çok teşekkür ederim.

Eğitim ve öğretim hayatım süresi içerisinde maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürler.

Erhan AKSU

Trabzon 2017

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Gemi Manevra Performansının Sistem Temelli Yaklaşımla Belirlenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Ercan KÖSE’nin sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 10/05/2017

Erhan AKSU

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER	V
ÖZET	VIII
SUMMARY.....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ	XVI
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Gemi Manevra Problemlerinde Yapılan Çalışmalar	7
1.3. Amaç ve Kapsam	10
1.4. Hareket Denklemleri	11
1.4.1. Altı Serbestlik Dereceli Hareket Denklemleri.....	11
1.4.2. Üç Serbestlik Dereceli Hareket Denklemleri	18
1.5. Matematiksel Modeller	19
1.5.1. Abkowitz Modeli.....	19
1.5.2. Blanke Modeli	25
1.5.3. Manevra Modelleme Grubu (MMG) Modeli	25
1.5.3.1. Tekne Hidrodinamik Kuvvetleri ve Momenti	26
1.5.3.2. Pervane Hidrodinamik Kuvvetleri ve Momenti	27
1.5.3.3. Dümen Hidrodinamik Kuvvetleri ve Momenti	29
1.5.3.3.1. Dümen Normal Kuvveti	30
1.5.3.3.2. Dümendeki Efektif Akış Hızının Boyuna Bileşeni	31
1.5.3.3.3. Dümendeki Efektif Akış Hızının Yanal Bileşeni	32
1.6. Deneysel Yöntemler ve Hidrodinamik Katsayıların Elde Edilmesi.....	34
1.6.1. Hareketlerin Tanımlanması	35

1.6.2.	Doğrusal Çekme Deneyi	36
1.6.3.	Dairesel Hareketli Mekanizma Deneyleri	38
1.6.3.1.	Dairesel Hareketli Mekanizmada Yalnızca Savrulma Deneyi	39
1.6.3.2.	Dairesel Hareketli Mekanizmada Belirli Bir Sürüklenme Açısıyla Savrulma Deneyi.....	41
1.6.4.	Düzlemsel Hareketli Mekanizma Deneyleri	42
1.6.4.1.	Düzlemsel Hareketli Mekanizmada Yalnızca Yanal Öteleme Deneyi	43
1.6.4.2.	Düzlemsel Hareketli Mekanizmada Yalnızca Savrulma Deneyi	46
1.6.4.3.	Düzlemsel Hareketli Mekanizmada Savrulma ve Sürüklenme Deneyi	49
1.6.5.	Hız Değişim Deneyleri.....	52
1.7.	Sistem Tanımlama.....	53
1.7.1.	Zamandan Bağımsız Lineer Sistemler	54
1.7.1.1.	Darbe Cevabı.....	54
1.7.1.2.	Örnekleme	55
1.7.1.3.	Düzensizlik.....	56
1.7.1.4.	Transfer Fonksiyonu	57
1.7.2.	Zamandan Bağımsız Lineer Sistem Modelleri.....	58
1.7.2.1.	Lineer Modeller ve Lineer Model Takımları Sistem Tanımlama	58
1.7.2.2.	Durum-Uzay Modelleri	60
1.7.2.2.1.	Fiziksel Temele Dayanan Sürekli-Zaman Modelleri	60
1.7.2.2.2.	Transfer Fonksiyonu Örnekleme	61
1.7.3.	Zamanla Değişen ve Lineer Olmayan Sistemler İçin Modeller	62
1.7.3.1.	Lineer, Zamanla Değişen Modeller.....	62
1.7.3.1.1.	Ağırlık Fonksiyonu	62
1.7.3.1.2.	Zamanla Değişen Durum-Uzay Modeli	63
1.7.3.1.3.	Lineer Olmayan Sistemlerin Lineerleştirilmesi	64
1.7.3.2.	Lineer Olmayan Durum-Uzay Modelleri	65
1.7.3.2.1.	Genel Model Takımı	65
1.7.3.2.2.	Lineer Olmayan Simülasyon Modeli	66
1.7.4.	Parametre Tahmin Metotları	67
1.7.4.1.	Parametre Tahmini Metotlarında Temel Prensipler	67
1.7.4.2.	Tahmini Hatanın Minimum Edilmesi	68
1.7.4.3.	Parametrelerin Tahmini İçin Yöntemler.....	70

2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME	74
2.1.	Mariner Teknesi ve Manevra Simülasyonları	74
2.2.	KVLCC1, KVLCC2 Tekneleri ve Manevra Simülasyonları	90
2.2.1.	Tekne Formları ve Ana Boyutlar.....	90
2.2.2.	Hareket Denklemleri	93
2.2.3.	MMG Modeli Uygulaması	94
2.2.4.	Abkowitz Modeli Uygulaması	124
2.2.5.	Blanke Modeli Uygulaması.....	149
2.2.6.	Sistem Tanımlama Uygulaması	168
3.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	182
4.	KAYNAKLAR.....	186
ÖZGEÇMİŞ		

Doktora Tezi

ÖZET

GEMİ MANEVRA PERFORMANSININ SİSTEM TEMELLİ YAKLAŞIMLA
BELİRLENMESİ

Erhan AKSU

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Ercan KÖSE
2017, 190 Sayfa

Bu çalışmada, kıç formu V ve U formunda olan iki farklı tankerin manevra performanslarının belirlenmesi için sistem temelli simülasyon metotları kullanılmıştır. Yanal kuvvetin ve savrulma momentinin ikinci ve üçüncü derece polinomlarla yazılması suretiyle, MMG (Manevra Modelleme Grubu), Abkowitz ve Blanke konseptlerine dayalı altı farklı üç serbestlik dereceli matematiksel model uygulanmıştır. Matematiksel modellerdeki KVLCC1 ve KVLCC2 teknelerinin hidrodinamik katsayıları ve ilgili parametreleri NMRI'nın (Uluslararası Denizcilik Araştırma Enstitüsü, Japonya) ve MOERI'nın (Denizcilik ve Deniz Bilimleri Araştırma Enstitüsü, Kore) doğrusal çekme, döner kol mekanizma ve yatay düzlem mekanizma deneysel verileri kullanılarak tahmin edilmiştir. Dönme ($\pm 35^\circ$), zigzag ($\pm 10^\circ/\pm 10^\circ$) ve zigzag ($\pm 20^\circ/\pm 20^\circ$) manevra hareketleri; tutsak deneylerin yapıldığı modeller, serbest deneylerin yapıldığı modeller ve tam ölçek boyutunda tekne olmak üzere hem KVLCC1 hem de KVLCC2'nin üç farklı tekne büyüklüğü için simüle edildi ve MARIN'ın (Denizcilik Araştırma Enstitüsü, Hollanda) serbest model deney verileriyle karşılaştırıldı. Ayrıca tez çalışmasında duyarlılık analizi neticesinde Mariner teknesine ait matematiksel model basitleştirilmiş ve sistem tanımlama yöntemlerinden birisi olan gri kutu yaklaşımında kullanılan iteratif çözüm algoritmasının performansı ortaya koyulmuştur. Deneysel yöntemlere dayanarak gerçekleştirilen özellikle tam ölçekli teknelerin simülasyonlarında ortaya çıkan hem dönme hem de zigzag manevralarının bir arada gerçek değerlerle uyuşmaması sorunu gri kutu yaklaşımı ile yeniden tahmin edilen hidrodinamik katsayılar ve parametrelerin mevcut matematiksel modellerde kullanılmasıyla aşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Tankerler, manevra, matematiksel model

Ph.D. Thesis

SUMMARY

DETERMINATION OF SHIP MANEUVERING PERFORMANCE WITH SYSTEM BASED APPROACH

Erhan AKSU

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Naval Architecture and Marine Engineering Program
Supervisor: Prof. Dr. Ercan KÖSE
2017, 190 Pages

In this study, system based simulation methods were utilized to determine maneuvering performances of two tankers which have U and V stern forms. By the representation of lateral force and yaw moment with second and third order polynomials; six different mathematical models with three degrees of freedom based on MMG (Maneuvering Modeling Group), Abkowitz and Blanke concepts were utilized. Hydrodynamic coefficients and related parameters of the two hulls KVLCC1 and KVLCC2 in mathematical models were estimated by using the straight line test, circular motion mechanism test and planar motion mechanism test experimental data of NMRI (National Maritime Research Institute, Japan) and MOERI (Maritime and Ocean Engineering Research Institute, Korea). Turning circle ($\pm 35^\circ$), zigzag ($\pm 10^\circ/\pm 10^\circ$) and zigzag ($\pm 20^\circ/\pm 20^\circ$) maneuvering motions were simulated for models with captive model tests and free model tests, and full scale hulls of both KVLCC1 and KVLCC2 with three different hull dimensions and compared with the free test experimental data of MARIN (Maritime Research Institute Netherlands). Additionally, as a result of sensitivity analysis, mathematical model of Mariner hull was simplified and performance of iterative solution algorithm used in grey box method, which is one of the system identification methods, was presented. The problem, which occurs particularly in full scale hull simulations, with the disagreement of both turning and zigzag maneuvering together in simulations based on experimental methods has been overcome by utilization of hydrodynamic coefficients and parameters re-estimated with grey box method.

Key Words: Tankers, maneuvering, mathematical model

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Manevra tahmin yöntemleri (ITTC, 2008).....	2
Şekil 2.	Manevra tahmin yöntemlerinin emek/fiyat-doğruluk değişimi (ITTC, 2008)..	3
Şekil 3.	Dünya merkezli ve gemi merkezli eksen takımları (Yoon, 2009)	12
Şekil 4.	X ile v arasındaki üç olası durum (Lewis, 1989)	21
Şekil 5.	(a) Y ile $\dot{v}$ arasındaki ilişki, (b) Y ile v ve N ile v arasındaki ilişki, (c) Y ile r ve N ile r arasındaki ilişki (Lewis, 1989)	23
Şekil 6.	Koordinat sistemi ve hareket parametreleri (Yoon, 2009).....	35
Şekil 7.	Doğrusal çekme hareketi (Yoon, 2009)	37
Şekil 8.	Dairesel hareketli mekanizma deneyi (Zaojian, 2006).....	39
Şekil 9.	Dairesel hareketli mekanizma deneyinde yalnızca savrulma hareketi	40
Şekil 10.	Dairesel hareketli mekanizma deneyinde belirli bir sürüklenme açısıyla savrulma hareketi	41
Şekil 11.	Düzlemsel hareketli mekanizma deneyi (Zaojian, 2006).....	42
Şekil 12.	Düzlemsel hareketli mekanizma deneyinde yalnızca yanal öteleme hareketi (Yoon, 2009)	44
Şekil 13.	Düzlemsel hareketli mekanizma deneyinde yalnızca savrulma hareketi (Yoon, 2009).....	46
Şekil 14.	Düzlemsel hareketli mekanizma deneyinde savrulma ve sürüklenme hareketi (Yoon, 2009)	50
Şekil 15.	Sistem (Ljung, 1999).....	55
Şekil 16.	Düzensizlik eklentili sistem (Ljung, 1999)	57
Şekil 17.	Duyarlılık işleminin süreci	77
Şekil 18.	Hidrodinamik katsayıların duyarlılık değerleri	79
Şekil 19.	Eksiltilmiş matematiksel modellerin 120° S-tip ve dönme manevraları.....	80
Şekil 20.	Eksiltilmiş matematiksel modellerin zigzag 10°/10° ve zigzag 20°/20° manevraları	81
Şekil 21.	Eksiltilmiş matematiksel modellerin yeni hidrodinamik katsayılarla 120° S-tip ve dönme manevraları	87

Şekil 22.	Eksiltilmiş matematiksel modellerin yeni hidrodinamik katsayılarla zigzag 10°/10° ve zigzag 20°/20° manevraları	88
Şekil 23.	En kesit eğrileri(postalar) (Simman, 2008a)	90
Şekil 24.	KVLCC1 ve KVLCC2 teknelerinin kış görünümü (Simman, 2008a).....	93
Şekil 25.	Gemi orta noktası merkezli eksen takımı	93
Şekil 26.	Tekne kuvvetleri ve momentinin yanal hız ve savrulma hızı arasındaki ilişki (CMT-KVLCC1).....	96
Şekil 27.	Açık su pervane karakteristiği (NMRI).....	99
Şekil 28.	Tekne dümen etkileşim katsayıları için ilgili büyükler arasındaki ilişkiler (NMRI-KVLCC1)	102
Şekil 29.	u_R/u_P ve $\sqrt{1 + 8K_T/\pi J_P^2} - 1$ arasındaki ilişki (NMRI-KVLCC1).....	103
Şekil 30.	Akış doğrultma testinde elde edilmiş δ_{FN0} ve $dF'_N/d\delta$ değerleri	104
Şekil 31.	Yanal efektif akış hızı analiz sonuçları (NMRI-KVLCC1)	105
Şekil 32.	Dönme manevraları-KVLCC1-MODEL 1 ($\delta=-35^\circ/35^\circ$).....	109
Şekil 33.	Zigzag manevraları-KVLCC1-MODEL 1 ($\delta=-10^\circ/10^\circ&10^\circ/-10^\circ$).....	110
Şekil 34.	Zigzag manevraları-KVLCC1-MODEL 1 ($\delta=-20^\circ/20^\circ&20^\circ/-20^\circ$).....	111
Şekil 35.	Dönme manevraları-KVLCC1-MODEL 2 ($\delta=-35^\circ/35^\circ$)	112
Şekil 36.	Zigzag manevraları-KVLCC1-MODEL 2 ($\delta=-10^\circ/10^\circ&10^\circ/-10^\circ$).....	113
Şekil 37.	Zigzag manevraları-KVLCC1-MODEL 2 ($\delta=-20^\circ/20^\circ&20^\circ/-20^\circ$).....	114
Şekil 38.	Dönme manevraları-KVLCC2-MODEL 1 ($\delta=-35^\circ/35^\circ$)	115
Şekil 39.	Zigzag manevraları-KVLCC2-MODEL 1 ($\delta=-10^\circ/10^\circ&10^\circ/-10^\circ$).....	116
Şekil 40.	Zigzag manevraları-KVLCC2-MODEL 1 ($\delta=-20^\circ/20^\circ&20^\circ/-20^\circ$).....	117
Şekil 41.	Dönme manevraları-KVLCC2-MODEL 2 ($\delta=-35^\circ/35^\circ$)	118
Şekil 42.	Zigzag manevraları-KVLCC2-MODEL 2 ($\delta=-10^\circ/10^\circ&10^\circ/-10^\circ$).....	119
Şekil 43.	Zigzag manevraları-KVLCC2-MODEL 2 ($\delta=-20^\circ/20^\circ&20^\circ/-20^\circ$).....	120
Şekil 44.	Teknelerin direnç değerleri (MOERI-KVLCC1)	126
Şekil 45.	Dönme manevraları-KVLCC1-MODEL 3 ($\delta=-35^\circ/35^\circ$)	134
Şekil 46.	Zigzag manevraları-KVLCC1-MODEL 3 ($\delta=-10^\circ/10^\circ&10^\circ/-10^\circ$).....	135
Şekil 47.	Zigzag manevraları-KVLCC1-MODEL 3 ($\delta=-20^\circ/20^\circ&20^\circ/-20^\circ$).....	136
Şekil 48.	Dönme manevraları-KVLCC1-MODEL 4 ($\delta=-35^\circ/35^\circ$)	137
Şekil 49.	Zigzag manevraları-KVLCC1-MODEL 4 ($\delta=-10^\circ/10^\circ&10^\circ/-10^\circ$).....	138
Şekil 50.	Zigzag manevraları-KVLCC1-MODEL 4 ($\delta=-20^\circ/20^\circ&20^\circ/-20^\circ$).....	139
Şekil 51.	Dönme manevraları-KVLCC2-MODEL 3 ($\delta=-35^\circ/35^\circ$)	140

Şekil 52.	Zigzag manevraları-KVLCC2-MODEL 3 ($\delta=-10^{\circ}/10^{\circ}\&10^{\circ}/-10^{\circ}$).....	141
Şekil 53.	Zigzag manevraları-KVLCC2-MODEL 3 ($\delta=-20^{\circ}/20^{\circ}\&20^{\circ}/-20^{\circ}$).....	142
Şekil 54.	Dönme manevraları-KVLCC2-MODEL 4 ($\delta=-35^{\circ}/35^{\circ}$)	143
Şekil 55.	Zigzag manevraları-KVLCC2-MODEL 4 ($\delta=-10^{\circ}/10^{\circ}\&10^{\circ}/-10^{\circ}$).....	144
Şekil 56.	Zigzag manevraları-KVLCC2-MODEL 4 ($\delta=-20^{\circ}/20^{\circ}\&20^{\circ}/-20^{\circ}$).....	145
Şekil 57.	Dönme manevraları-KVLCC1-MODEL 5 ($\delta=-35^{\circ}/35^{\circ}$)	153
Şekil 58.	Zigzag manevraları-KVLCC1-MODEL 5 ($\delta=-10^{\circ}/10^{\circ}\&10^{\circ}/-10^{\circ}$).....	154
Şekil 59.	Zigzag manevraları-KVLCC1-MODEL 5 ($\delta=-20^{\circ}/20^{\circ}\&20^{\circ}/-20^{\circ}$).....	155
Şekil 60.	Dönme manevraları-KVLCC1-MODEL 6 ($\delta=-35^{\circ}/35^{\circ}$)	156
Şekil 61.	Zigzag manevraları-KVLCC1-MODEL 6 ($\delta=-10^{\circ}/10^{\circ}\&10^{\circ}/-10^{\circ}$).....	157
Şekil 62.	Zigzag manevraları-KVLCC1-MODEL 6 ($\delta=-20^{\circ}/20^{\circ}\&20^{\circ}/-20^{\circ}$).....	158
Şekil 63.	Dönme manevraları-KVLCC2-MODEL 5 ($\delta=-35^{\circ}/35^{\circ}$)	159
Şekil 64.	Zigzag manevraları-KVLCC2-MODEL 5 ($\delta=-10^{\circ}/10^{\circ}\&10^{\circ}/-10^{\circ}$).....	160
Şekil 65.	Zigzag manevraları-KVLCC2-MODEL 5 ($\delta=-20^{\circ}/20^{\circ}\&20^{\circ}/-20^{\circ}$).....	161
Şekil 66.	Dönme manevraları-KVLCC2-MODEL 6 ($\delta=-35^{\circ}/35^{\circ}$)	162
Şekil 67.	Zigzag manevraları-KVLCC2-MODEL 6 ($\delta=-10^{\circ}/10^{\circ}\&10^{\circ}/-10^{\circ}$).....	163
Şekil 68.	Zigzag manevraları-KVLCC2-MODEL 6 ($\delta=-20^{\circ}/20^{\circ}\&20^{\circ}/-20^{\circ}$).....	164
Şekil 69.	Dönme manevraları-KVLCC1 ($\delta=-35^{\circ}/35^{\circ}$).....	174
Şekil 70.	Zigzag manevraları-KVLCC1 ($\delta=-10^{\circ}/10^{\circ}\&10^{\circ}/-10^{\circ}$)	175
Şekil 71.	Zigzag manevraları-KVLCC1 ($\delta=-20^{\circ}/20^{\circ}\&20^{\circ}/-20^{\circ}$)	176
Şekil 72.	Dönme manevraları-KVLCC2 ($\delta=-35^{\circ}/35^{\circ}$).....	177
Şekil 73.	Zigzag manevraları-KVLCC2 ($\delta=-10^{\circ}/10^{\circ}\&10^{\circ}/-10^{\circ}$)	178
Şekil 74.	Zigzag manevraları-KVLCC2 ($\delta=-20^{\circ}/20^{\circ}\&20^{\circ}/-20^{\circ}$)	179

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.	x, y ve z yönlerindeki hareket, hız ve kuvvet/moment bileşenleri	12
Tablo 2.	Mariner teknesinin ana boyutları ve diğer büyüklükleri	74
Tablo 3.	Eksiltilmiş hidro dinamik katsayılar	78
Tablo 4.	120° S-tip ve dönme modellerine göre hızların yüzdelik nrmse değerleri	82
Tablo 5.	Zigzag 10°/10° ve zigzag 20°/20° modellerine göre hızların yüzdelik nrmse değerleri	82
Tablo 6.	Hızların ortalama toplam yüzdelik nrmse değerleri	82
Tablo 7.	X denklemindeki hidro dinamik katsayılar	84
Tablo 8.	Y denklemindeki hidro dinamik katsayılar	85
Tablo 9.	N denklemindeki hidro dinamik katsayılar	86
Tablo 10.	Yeni katsayılarla 120° S-tip ve dönme modellerine göre hızların yüzdelik nrmse değerleri	89
Tablo 11.	Yeni katsayılarla zigzag 10°/10° ve zigzag 20°/20° modellerine göre hızların yüzdelik nrmse değerleri	89
Tablo 12.	Yeni katsayılar için hızların ortalama toplam yüzdelik nrmse değerleri	89
Tablo 13.	KVLCC1 teknesinin ana boyutları (Simman, 2008a)	91
Tablo 14.	KVLCC2 teknesinin ana boyutları (Simman, 2008a)	92
Tablo 15.	Servis hızlarına karşılık gelen direnç değerleri	95
Tablo 16.	KVLCC1 için hidro dinamik katsayılar	97
Tablo 17.	KVLCC2 için hidro dinamik katsayılar	98
Tablo 18.	KVLCC1 ve KVLCC2 için atalet ile ilgili hidro dinamik katsayılar	99
Tablo 19.	KVLCC1 ve KVLCC2 teknelerinin itme azalması, iz katsayısı ve pervane devir sayıları	100
Tablo 20.	Dümen ile ilgili geometrik büyüklükler	100
Tablo 21.	Dümen ile ilgili katsayılar	106
Tablo 22.	KVLCC1-MODEL 1 için dönme manevrası indeksleri	121
Tablo 23.	KVLCC1-MODEL 1 için zigzag manevrası indeksleri	121

Tablo 24.	KVLCC1-MODEL 2 için dönme manevrası indeksleri	122
Tablo 25.	KVLCC1-MODEL 2 için zigzag manevrası indeksleri	122
Tablo 26.	KVLCC2-MODEL 1 için dönme manevrası indeksleri	123
Tablo 27.	KVLCC2-MODEL 1 için zigzag manevrası indeksleri	123
Tablo 28.	KVLCC2-MODEL 2 için dönme manevrası indeksleri	124
Tablo 29.	KVLCC2-MODEL 2 için zigzag manevrası indeksleri	124
Tablo 30.	KVLCC1 ve KVLCC2 teknelerinin direnç kuvveti ile ilgili hidrodinamik katsayıları.....	126
Tablo 31.	KVLCC1 ve KVLCC2 tekneleri için atalet ile ilgili hidrodinamik katsayılar	127
Tablo 32.	Hidrodinamik katsayıların elde edildiği deney türleri	127
Tablo 33.	KVLCC1 ve KVLCC2 tekneleri için X kuvveti ile ilgili hidrodinamik katsayılar.....	128
Tablo 34.	KVLCC1 teknelesi için Y kuvveti ile ilgili hidrodinamik katsayılar	129
Tablo 35.	KVLCC1 teknelesi için N momenti ile ilgili hidrodinamik katsayılar.....	130
Tablo 36.	KVLCC2 teknelesi için Y kuvveti ile ilgili hidrodinamik katsayılar	131
Tablo 37.	KVLCC2 teknelesi için N momenti ile ilgili hidrodinamik katsayılar.....	132
Tablo 38.	KVLCC1-MODEL 3 için dönme manevrası indeksleri	146
Tablo 39.	KVLCC1-MODEL 3 için zigzag manevrası indeksleri	146
Tablo 40.	KVLCC1-MODEL 4 için dönme manevrası indeksleri	147
Tablo 41.	KVLCC1-MODEL 4 için zigzag manevrası indeksleri	147
Tablo 42.	KVLCC2-MODEL 3 için dönme manevrası indeksleri	148
Tablo 43.	KVLCC2-MODEL 3 için zigzag manevrası indeksleri	148
Tablo 44.	KVLCC2-MODEL 4 için dönme manevrası indeksleri	149
Tablo 45.	KVLCC2-MODEL 4 için zigzag manevrası indeksleri	149
Tablo 46.	KVLCC1 ve KVLCC2 teknelerinin direnç kuvveti ile ilgili hidrodinamik katsayıları.....	151
Tablo 47.	KVLCC1-MODEL 5 için dönme manevrası indeksleri	165
Tablo 48.	KVLCC1-MODEL 5 için zigzag manevrası indeksleri	165
Tablo 49.	KVLCC1-MODEL 6 için dönme manevrası indeksleri	166
Tablo 50.	KVLCC1-MODEL 6 için zigzag manevrası indeksleri	166
Tablo 51.	KVLCC2-MODEL 5 için dönme manevrası indeksleri	167
Tablo 52.	KVLCC2-MODEL 5 için zigzag manevrası indeksleri	167
Tablo 53.	KVLCC2-MODEL 6 için dönme manevrası indeksleri	168

Tablo 54.	KVLCC2-MODEL 6 için zigzag manevrası indeksleri	168
Tablo 55.	MMG modelindeki yeniden hesaplanmış hidrodinamik katsayılar.....	170
Tablo 56.	Dümen ile ilgili yeniden hesaplanmış katsayılar	170
Tablo 57.	Abkowitz modelindeki yeniden hesaplanmış Y ile ilgili hidrodinamik katsayılar.....	171
Tablo 58.	Abkowitz modelindeki yeniden hesaplanmış N ile ilgili hidrodinamik katsayılar.....	172
Tablo 59.	KVLCC1 için dönme manevrası indeksleri.....	180
Tablo 60.	KVLCC1 için zigzag manevrası indeksleri	180
Tablo 61.	KVLCC2 için dönme manevrası indeksleri.....	181
Tablo 62.	KVLCC2 için zigzag manevrası indeksleri	181

SEMBOLLER DİZİNİ

a_H	: Dümen hareketinden dolayı tekne katsayısı [-]
A_R	: Dümen alanı [m^2]
A_D'	: Boyutsuz ilerleme mesafesi [-]
a, b, c, d, e	: Polinomun katsayıları
D_p	: Pervane çapı [m]
D_T'	: Boyutsuz taktik çap [-]
D_M	: model yapısında θ 'nın değer seti [-]
$e(t)$	: t anında düzensizlik [-]
F	: Toplam dış kuvvet [N]
F_N	: Dümen normal kuvveti [N]
F_T	: Dümen teğetsel kuvveti [N]
f_a	: Dümen normal kuvveti katsayısının değişimi [-]
$G(q)$	: u 'dan y 'ye transfer fonksiyonu [-]
$G(q, \theta)$	: model yapısı içerisinde transfer fonksiyonu [-]
$H(q)$	: e 'den y 'ye transfer fonksiyonu [-]
$H(q, \theta)$	: model yapısı içerisinde transfer fonksiyonu [-]
I_{ii}	: ii ekseninde orijindeki atalet momenti (ii:xx,yy,zz,xy,xz,yz) [kgm^2]
I_{iiG}	: xx ekseninde ağırlık merkezindeki atalet momenti (ii:xx,yy,zz) [kgm^2]
I_G	: Ağırlık merkezindeki atalet momenti [kgm^2]
J	: İlerleme katsayısı [-]
J_{zz}	: Savrulma hareketinden dolayı ek atalet momenti [kgm^2]
K	: Yalpa momenti [Nm]
K_T	: İtme katsayısı [-]
$L(q)$	: hata tahmini için ön filtreleme [-]

M_G	: Ağırlık merkezine göre toplam moment vektörü [Nm]
M	: Baş kıkırma momenti [Nm]
m	: Geminin kütlesi [kg]
m_x, m_y	: Boyuna ve yanıl hareketten dolayı ek kütle [kg]
m_i	: i. parçacığın kütlesi [kg]
N	: Savrulma momenti [Nm]
$N_v, \dots$	: N momentine ait hidrodinamik katsayılar
n	: Pervane devir sayısı [dev/s]
N_{Hv}	: Hıza bağılı savrulma tekne momenti [Nm]
N_{Ha}	: İvmeye bağılı savrulma tekne momenti [Nm]
N_{NL}	: Lineer olmayan savrulma tekne momenti [Nm]
N_i	: Tekne, pervane ve dümen momenti (i:H,P,R,) [Nm]
p	: Yalpa hızı [rad/s]
$\dot{p}$	: Yalpa ivmesi [rad/s ²]
q	: Baş kıkırma hızı [rad/s]
$\dot{q}$	: Baş kıkırma ivmesi [rad/s ²]
$\vec{R}_G$	: Yarıçap vektörü [m]
r	: Savrulma hızı [rad/s]
$\dot{r}$	: Savrulma ivmesi [rad/s ²]
r_E	: evrensel koordinat ekseninde savrulma hızı [m/s]
$\dot{r}_E$	: evrensel koordinat ekseninde savrulma ivmesi [m/s ²]
T_p	: Pervane itme kuvveti [N]
T_R'	: Boyutsuz transfer mesafesi [-]
t_p	: İtme azalması [-]
t_R	: Dümen kuvvetinin azalma faktörü [-]
t	: zaman [s]
u	: Boyuna öteleme hızı [m/s]
u_E, v_E	: evrensel koordinat ekseninde ileri ve yanıl hız [m/s]
$\dot{u}_E, \dot{v}_E$	: evrensel koordinat ekseninde ileri ve yanıl ivme [m/s ²]

$\ddot{u}$	: Boyuna öteleme ivmesi [m/s^2]
u_R	: Dümene gelen akışın boyuna hız bileşeni [m/s]
U_R	: Dümene gelen akışın bileşke hızı [m/s]
U_c	: Çekme tankı hızı [m/s]
$u(t)$	: t anında girdi değişkeni [-]
V	: Cismin orijinindeki hız vektörü [m/s]
V_G	: Ağırlık merkezindeki hız vektörü [m/s]
V_N	: minimize edilecek kriter fonksiyonu [-]
v	: Yanal öteleme hızı [m/s]
$\dot{v}$	: Yanal öteleme hızı [m/s^2]
v_R	: Dümene gelen akışın yanal hız bileşeni [m/s]
w	: Dalıp çıkma hızı [m/s]
$\dot{w}$	: Dalıp çıkma ivmesi [m/s^2]
w_p	: İz katsayısı [-]
w_{p0}	: Doğrusal iz katsayısı [-]
X	: Boyuna kuvvet [N]
x_i	: i. parçacığın x ekseninde orijinden olan mesafesi [m]
$X_{vv}, \dots$	: X kuvvetine ait hidrodinamik katsayılar
x_G	: Ağırlık merkezinin x ekseninde orijinden olan mesafesi [m]
x_p	: Pervanenin orijine olan mesafesi [m]
$x(t)$	: t anında durum vektörü [-]
X_H, Y_H	: Boyuna ve yanal tekne kuvveti [N]
X_p, Y_p	: Boyuna ve yanal pervane kuvveti [N]
X_R, Y_R	: Boyuna ve yanal dümen kuvveti [N]
X_{Ha}, Y_{Ha}	: İvmeye bağlı boyuna ve yanal tekne kuvveti [N]
X_{Hv}, Y_{Hv}	: Hıza bağlı boyuna ve yanal tekne kuvveti [N]
x_H	: $a_H F_N$ 'nin uygulama noktası [m]
x_R	: Dümene orijine olan boyuna mesafesi [m]

x_E, y_E	: x,y evrensel koordinat eksenleri [-]
Y	: Yanal kuvvet [N]
$Y_v, \dots$	: Y kuvvetine ait hidrodinamik katsayılar
Y_{NL}	: Lineer olmayan yan al tekne kuvveti [N]
y_G	: Ağırlık merkezinin y ekseninde orijinden olan mesafesi [m]
y_i	: i. parçacığın y ekseninde orijinden olan mesafesi [m]
$y(t)$	: t anında çıktı değışkeni [-]
Z	: Dalıp çıkma kuvveti [N]
Z^t	: t anında girdi-çık tı değışkenleri [-]
z_G	: Ağırlık merkezinin z ekseninde orijinden olan mesafesi [m]
z_i	: i. parçacığın z ekseninde orijinden olan mesafesi [m]
$\vec{\Omega}$	: Dönme hız vektörü [rad/s]
ρ	: Suyun yoğunluğu [kg/m ³]
δ	: Dümen açısı [rad]
α_R	: Dümen bölgesinde efektif akış açısı [rad]
λ	: Dümenin en boy oranı [-]
ε	: Hidrodinamik aç t [rad]
η	: Dümen yüksekliği pervane çap t oranı [-]
β_R	: Dümenin sürüklenme açısı [rad]
β	: Teknenin sürüklenme açısı [rad]
ψ	: savrulma açısı [rad]
q, q^{-1}	: ileri ve geri operatör [-]
θ	: parametre vektörü [-]
$w(t)$	: t anında düzensizlik değışkeni [-]
$\varepsilon(t, \theta)$	: tahmin hatası [-]
$\ell(\varepsilon)$	: tahmin hatası için ölçüt [-]

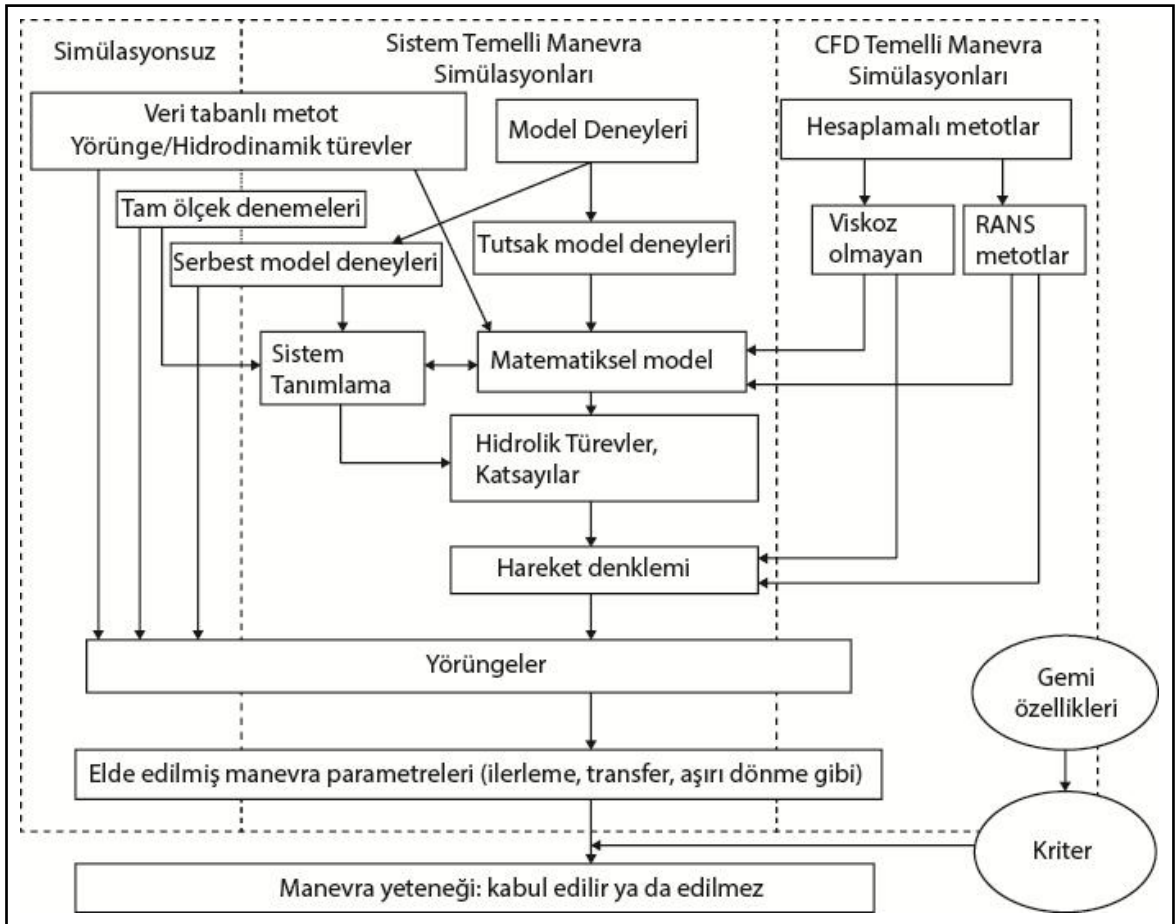
1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Gemilerin hidrodinamik performansları gemi direnci ve sevki, denizcilik ve manevra olmak üzere üç temel konu başlığı altında incelenir. Gemi inşaatı mühendislerinin direnç sevk sistemi ilişkisi, denizcilik performansı gibi tasarım kriterlerini yerine getirmesinin yanı sıra bir geminin manevra kabiliyeti üzerine de bir araştırma yapması gerekmektedir. Bir geminin manevra kabiliyeti, kontrollü olarak geminin hareketinin değiştirilmesi veya değiştirilmemesi anlamına gelmektedir. Örneğin gemiyi yönlendiren kişinin isteklerine göre gemi doğrusal rota üzerinde sabit hızla veya hızı değiştirilerek hareket ettirilir ya da geminin rotası veya pozisyonu değiştirilir. Bir geminin manevra kabiliyetini belirleyebilmek için dinamik stabilite, dönme kabiliyeti, doğrusal rota stabilitesi, rota değiştirme kabiliyeti, dönme kontrol kabiliyeti ve durma kabiliyeti konularının ele alınması gerekmektedir. Doğrusal rota üzerinde hareket eden geminin küçük bir müdahale sonucunda kontrol olmaksızın yeni bir doğrusal rota üzerinde hareket etmesi geminin dinamik stabiliteye sahip olduğunu gösterir. Dönme kabiliyeti dümenin sancak veya iskele yönünde döndürüldüğünde geminin dönme yeteneğidir. Doğrusal rota stabilitesi, doğrusal rota üzerinde hareket eden bir geminin orijinal gidiş yönünü korumasıdır. Rota değiştirme kabiliyeti, geminin dümene tepkisini gösterir. Dönme kontrol kabiliyeti, geminin belirli bir yönde dönme durumunda uygulanan karşıt yöndeki dümen hareketine cevap verme yeteneğidir. Durma kabiliyeti, geminin tam hızla hareket ederken sevk sisteminin durması veya tornistan edilmesi sonucu geminin göstereceği tepkiyi ifade eder. Geminin manevra kabiliyeti doğrudan navigasyon güvenliği ve ekonomi açısından önemlidir. Şiddetli çevresel koşullar altında veya kanal, boğaz gibi sınırlı sularda yeterli manevra kabiliyetine sahip bir gemi değilse, kazalara sebebiyet verebilir. Örneğin eğer bir gemi yeterli dönme kabiliyetine sahip değilse açık denizler veya kanallarda karşılaşacağı herhangi bir cisimden rahatlıkla kurtulamayacak cisimle çarpışması önlenemeyecektir. Bunun yanı sıra dinamik olarak stabil olmayan bir gemi sürekli olarak dümen müdahalesi gerçekleştirilerek rotasında kalacaktır. Böyle bir durumda seyir planlanandan daha uzun olacak, sürekli dümen müdahalesinden dolayı da enerji gereksinimine ihtiyaç olacaktır. Bu faktörlerin dışında kaptan, serdümen, kılavuz gibi insan faktörü ve akıntı, dalga, rüzgâr, trafik gibi

geminin seyrettiği suyunun özellikleri de geminin manevra kabiliyetini etkileyen unsurlardır.

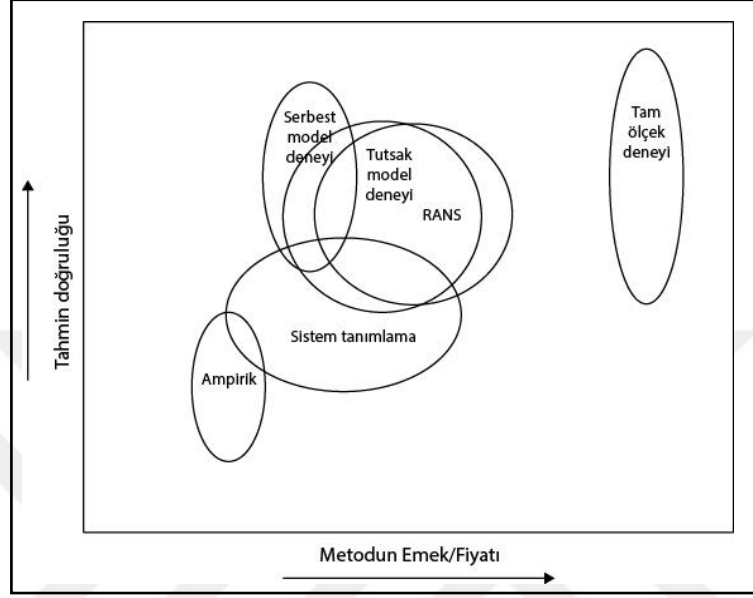
Geminin manevra kabiliyetini belirleyebilmek için teknenin ana boyutları, formu, sevk ve manevra sistem özelliklerinden yararlanarak bir takım yöntemlerin kullanılması gerekmektedir. Şekil 1’de görüleceği üzere simülasyonun olmadığı, sistem temelli manevra simülasyonları ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği temelli simülasyonlar olmak üzere temelde üç yöntem mevcuttur (ITTC, 2008).



Şekil 1. Manevra tahmin yöntemleri (ITTC, 2008)

ITTC Manevra Komitesi tarafından bu yöntemlere genel bir bakış yapılmıştır. Bu yöntemlerin doğrulukları ve maliyetleri teknolojik gelişmelerle değişecektir. Şekil 2’de görüleceği üzere Simman 2008 çalıştayında, bu yöntemlerin doğruluğu ve harcanan emek üzerine yapılan çalışmalarda rehberlik etmesi adına çok önemli karşılaştırma yapılmıştır. Bu bilgi her bir enstitünün deneyimi ve belirli gemi tipine bağlı olduğundan kesin değildir.

Belirli bir yöntemin kullanımı tam olarak doğru sonuçların elde edilemeyeceği belirli bir riski içerisinde barındırır. Bu açıdan yöntemlerin avantajları ve dezavantajları hakkında bilgi sahibi olmak manevra tahmini açısından önemli olacaktır.



Şekil 2. Manevra tahmin yöntemlerinin emek/fiyat-doğruluk değişimi (ITTC, 2008)

➤ Serbest model deneylerine dayalı tahminler

Serbest model deneyleri, belirli manevraları örneğin dönme ve zigzag hareketlerinin otomatik kontrol yardımıyla gerçekleştirildiği deneylerdir. Genellikle gerçeği tam manasıyla yansıttığına inanılır. Ölçek etkilerinin dışında herhangi bir kabulü gerektirmemektedir.

Avantajları:

- Gerçeği tamamıyla yansıtmaktadır.
- Doğrudan deney esnasında sonuçları görme imkanı vardır.
- Bir kez gerçekleştirildiğinde, teknede veya dümende yapılacak düzeltmelerle yeniden deneme yapılmasına olanak verir.
- Düşük maliyetlidir.

- Havuzda gerçekleşmesi (gölde değil) çevre koşullarının etkilerini (sığ su, rüzgar, dalga) ortadan kaldırmaktadır.

Dezavantajları:

- Oldukça büyük bir havuz gerekmektedir.
- Geminin nasıl manevra yaptığı yönünde fiziksel bir bilgi edinemeyiz.
- Matematiksel modelin oluşturulmasına yönelik doğrudan bilgi sahibi olamayız.
- Belirli çevre şartları, kanallar oldukça iyi modellenenebilir fakat ek bütçe gerekmektedir.

➤ Tutsak model deneylerine dayalı tahminler

Tutsak deneyleri geminin ölçeklendirilmiş modeli üzerinde gerçekleştirilir. Bu deneyler matematiksel model ve hidrodinamik katsayıların elde edilmesi için analiz edilir. Tutsak deneylerinin, düzlemsel hareketli mekanizma (PMM) , bilgisayarlı düzlemsel hareketli taşıyıcı (CMPC), döner kol (CMT) veya sürüklenme deneyleri gibi çeşitleri vardır. Bu deneylerde dümen kuvveti ölçümleri de gerçekleşir. Matematiksel modelin durum değerlendirmesi için genellikle serbest model deneyleri kullanılır.

Avantajları:

- Deneyler PMM ile çekme tankında veya CMT veya CPMC ile genişçe bir havuzda gerçekleştirilir.
- Simülasyonda kullanmak üzere matematiksel modelin oluşturulmasına odaklanılır. Model geniş bir aralıkta (dönme hızı ve sürüklenme açıları) hareket ettirmek istendiğinde köprü simülatörü kullanılabilir.

Dezavantajları:

- Performansa yönelik cevaplar doğrudan elde edilemez. Bazı ön işlemlerin yapılması gerekir.
- Matematiksel modelin doğruluğu doğrudan deney matrisindeki deney sayıları ile ilgilidir.
- Ekstrapolasyon dikkat edilmesi gereken bir konudur.

- Bu teknikle çözüm elde etmeye çalışılırken deney tecrübesine sahip olmak gerekir.

➤ Ampirik metotlara dayalı tahminler

Bu yöntemde matematiksel model ve manevra katsayıları kullanılır. Genellikle manevra katsayıları ya ampirik ya da yarı-teori/yarı-ampirik olarak elde edilir. Ampirik metotlar yalnızca benzer gemiler üzerine gerçekleştirilen yöntemlerdir.

Avantajları:

- Kullanımı kolay ve düşük maliyetlidir.
- Alternatif dümenler ile yeniden deneme yapılabilir.
- Matematiksel modele bağlı olarak dönme ve zig-zag manevralarının dışında farklı manevra simülasyonu için kullanılabilir.

Dezavantajları:

- Güvenirliliği ve doğruluğu sınırlıdır.
- Genellikle bu modeller tekne formunun detaylarını hesaba katmaz ve önemli olan manevra performansının değerlendirilmesidir.
- Bu metotlara sığ su problemlerinde daha az güvenilir.

➤ Sistem tanımlama metotlarına dayalı tahminler

Bir dizi manevrada bir matematiksel prosedür oluşturulur. Bu matematiksel prosedür matematiksel modeldeki hidrodinamik katsayıları optimize eder ve bu matematiksel model yeniden manevrayı çözer.

Avantajları:

- Bir dizi serbest manevra deneyinden sonra daha fazla manevra tahmini yapmak düşük maliyettedir.
- Model ölçeklerine ve tam ölçek manevralarına uygulanabilir.

Dezavantajları:

- Bulunan katsayılar fiziksel olarak doğru olmak zorunda değil fakat matematiksel olarak doğrudur. Bu prensip olarak orijinal verilerin aralığının dışındaki dümen açısı, sürüklenme açısı ve savrulma hızlarında hiçbir manevranın oluşturulamayacağı anlamına gelir.
- Kullanılacak veriler yeterli sayıda ve açık olmalıdır.

➤ Viskoz akış- hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) kullanımına dayalı tahminler

Manevra tahmini için kullanılan viskoz akış-CFD'nin iki çeşidi mevcuttur. En çok kullanılan metot tutsak deneyleri için elde edilen Reynolds ortalamalı Navier-Stokes (RANS) hesaplamalarıdır. Matematiksel modeldeki katsayıların elde edilmesi için sonuçlar analiz edilir. İkinci tip RANS hesaplamalarında serbest model deneyindeki gibi dümen müdahaleli ve pervane itmeli tam zamanlı simülasyon gerçekleştirilir.

Avantajları:

- Fiziksel modelin oluşturulması gerekmez, nümerik modeldir.
- Gemi etrafındaki akış hakkında bilgi sahibi olmamız sağlanır.
- Pek çok simülasyon ölçekli model üzerinde gerçekleştirirken bu sayede tam ölçekli gemi üzerinde çalışma yapma imkanı sağlar. Böylece ölçek etkisi hakkında bilgi sahibi olunur.
- Çok iyi sonuçların elde edildiği görülmektedir.

Dezavantajları:

- RANS çözümleri hakkında örnek olarak ağ yapısı, türbülans modeli gibi konularda deneyim gerekmektedir.
- Sonuç elde edebilmek için uzmanlara gereksinim vardır.
- Yeterli kapasitede bilgisayarın olması gerekir.

➤ Potansiyel akış- hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) kullanımına dayalı tahminler

Potansiyel akış bir RANS çözümleri değildir. Bu kategoride panel kodları, girdap ağları ve girdap damlaları kodları vardır. RANS kodlarına benzer şekilde belirli ağ yapılarının ve

kesin ayarların bilinmesine gerek vardır. Potansiyel akış çözücülerini RANS'a göre daha az efor gerektirir fakat güvenilirliği daha azdır. Belirli alanlarda bu metodun iyi sonuçlar verdiği görülmektedir (ITTC, 2008).

Gemilerin manevra kabiliyetinin belirlenmesi için kullanılan yöntemlerin ardından performans ölçütleri oluşturulmalı ve bu ölçütlerin değerlendirilmesi yapılmalıdır. Böylece geminin yeterli manevra kabiliyetine sahip olup olmadığı ile ilgili bilgi sahibi olunur. Gemilerin manevra performansları seyir tecrübelerinde bir dizi manevra hareketinin yapılmasıyla belirlenir. Bunlar dönme, zigzag, durma, spiral, ters spiral, basit spiral ve çıkış manevra tecrübeleridir. Bunlardan dönme tecrübesinde doğrusal rota üzerinde giden bir geminin dümeni sancak veya iskele yönünde maksimum açığa kadar döndürülür ve bu şekilde geminin dönmesi sağlanır. Burada dönme çapı, ilerleme, transfer gibi ölçütlerle geminin dönme kabiliyeti üzerine bir fikir elde edilir. Zigzag tecrübesinde doğrusal rota üzerinde giden geminin dümeni iskele veya sancak yönünde 10° veya 20° döndürülür. Geminin rotası ile dümen açısı ile aynı olunca dümen aksi yönde döndürülür. Bu şekilde tecrübe sürekli tekrarlanır. Böylece bu tecrübeye geminin rota değiştirme, dönme kontrol kabiliyeti incelenmiş olur.

1.2. Gemi Manevra Problemlerinde Yapılan Çalışmalar

Gemi manevra performansının tahmini, karmaşık, kararsız ve doğrusal olmayan doğası nedeniyle, gemi hidrodinamiği araştırmalarında en zor konulardan biridir. Ayrıca gemi manevralarının tahmininde kullanılan yöntemin ve gemilerin tipi, sevk sistemi gibi özellikleri bakımından çok fazla uygulama literatürde mevcuttur. Yukarıda da belirtildiği üzere gemi manevra tahmin yöntemlerinden birisi olan sistem temelli simülasyon metodunda hidrodinamik katsayılar ile uygun matematiksel model kullanılması suretiyle hareket denklemi çözülür ve geminin yörüngesi simüle edilmiş olur. Matematiksel modellere dayanan gemi manevralarının tahmini, geçen yüzyılın ortalarında tüm dünyadaki birçok enstitüde başlamıştır. O tarihlerde mevcut ve yeni gemilerin direnç ve sevk özelliklerini anlamak için araştırma çalışmaları yapılmıştır. Buradan hareketle, bir geminin doğrusal ilerleme hareketini incelemekle kalmayıp, özellikle manevra performansını öğrenen araçlara ihtiyaç duyulmuştur.

Matematiksel modeller, hidrodinamik kuvvetler ve momentlerin Taylor serisiyle yazıldığı biçimsel matematiksel modeller ve manevra modelindeki elemanların ayrı ele

alındığı modüler matematiksel model olmak üzere iki gruba ayrılır. İlk olarak, 1960 yılında Abkowitz tarafından tanıtılan biçimsel matematiksel modelde hidrodinamik kuvvetler üçüncü derece Taylor serisi ile ifade edilmiştir (M.A. Abkowitz, 1964). 1971 yılında Norbin farklı hidrodinamik kuvvetlerin fiziksel altyapısını göstermeye çalıştığı bir matematiksel model sunmuştur (Norrbinn, 1971). Benzer şekilde gemi sevk sisteminde itme kayıpları ile ilgili olarak çalışma Blanke tarafından yapılmıştır (Blanke, 1981). 1980'li yıllarda manevra modelindeki elemanların ayrı ayrı tanıtılması temeline dayalı modüler konsepti çalışmalarda tanınmaya başlanmıştır. Bu açıdan Japonya Çekme Tankı Konferansında Manevra Modelleme Grubu (MMG) yeni bir matematiksel model hedeflediler. Burada tekne, dümen ve pervanenin ayrı ele alındığı ve birbirleriyle etkileşimlerinin de göz önünde tutulduğu bir model tasarlanmıştır (Ogawa A, Koyama T, & K, 1977). Ayrıca literatürde MMG modeline dayalı uygulamalar mevcuttur (Kose, 1982; Ogawa A & H, 1978; Yoshimura, 2005). Oltmann ve Sharma yüzey gemilerinde ana makine ve dümen manevralarının dijital simülasyonu için alternatif matematiksel model geliştirdi. Modelde teknenin manevra hareketine tepki olarak meydana gelen kompleks hidrodinamik kuvvetlerin matematiksel yaklaşımı gerçekleştirilmiştir. Bu modelde başlıca avantajı ileri geri harekete uyarlanabilir olmasıdır (S.D., 1984). Dand, daha geniş çevre koşulları altında belirli bir gemi tipi için daha esnek bir matematiksel model geliştirmiştir. Herhangi bir dümenin, pervanenin manevra davranışında etkileri modelde tekneye eklenebilir (Dand, 1900). Asinovsky, diferansiyel yaklaşımı tekne, dümen, pervanenin hidrodinamik karakteristiklerini ve etkileşimlerin analizi ve ayrı tanımlanması üzerinedir (Asinovsky, McMullen, & Landsburg, 1900). Ankudinov, her bir modülün değiştirilebilmesi için genel ve modüler bir matematiksel model üzerine çalışma gerçekleştirmiştir (Ankudinov, Kaplan, & Jacobsen, 1993).

Sistem temelli simülasyon metodu, veri tabanlı, model deneyleri ve sistem tanımlama metotlarından oluşmaktadır. Veri tabanlı metotta hidrodinamik katsayılar elde edebilmek için tam ölçek veya model teknelerin deney sonuçlarına ait verilerden oluşturulmuş regresyon denklemleri veya ampirik formüller kullanılır (Clarke, 1983; Inoue, 1981; K Kijima & Nakiri, 1990; Katsuro Kijima & Tanaka, 1993; Norrbinn, 1971; S.D., 1984; Wagner-Smitt, 1971). Bu veri tabanları MMG modeli (Katsuro Kijima & Tanaka, 1993) veya çapraz-akış itme modeli (Hoof, 1994) gibi teorik modellerle birleştirilebilir. Bu metot oldukça basit ve kullanımı kolaydır. Fakat geminin ölçüleri veri tabanının dışında ise güvenilirliği ve tahmin doğruluğu sınırlıdır. Model deneyleri metodu

serbest ve tutsak model deneylerinden oluşmaktadır. Martinussen ve Linnerud dönme performansı ve rota tutma kabiliyetini belirlemek için uzaktan kontrollü kendinden sevk sistemi olan model gemide dönme, zigzag ve ters spiral manevralarını yapmıştır (Martinussen & Linnerud, 1987). Bu yöntem manevra parametrelerinin simülasyona gerek duyulmadan elde edildiği için etkilidir. Bir diğeri tutsak model testlerinde matematiksel modeldeki hidrodinamik katsayılar farklı sürüklenme açısı, farklı savrulma hızları gibi öncesinde belirlenmiş hareketlerin gemi modeline zorlanmasıyla elde edilir. Son olarak bir diğeri metot olan sistem tanımlamanın manevra problemlerinde kullanımı literatürde uygulanan gemi tipleri ve yöntem bakımından çok fazla çeşitlilik göstermektedir. Örnek olarak çalışmaları sıralayabilir: Genişletilmiş Kalman filtreleme metodu (Martin A Abkowitz, 1980; Fossen, Sagatun, & Sørensen, 1996; Hyeon Kyu Yoon & Rhee, 2003; H. K. Yoon, Son, & Lee, 2007), frekans alanı tanımlama metodu (Perez & Fossen, 2011; S. K. Bhattacharyya, 2006), yinelemeli hata tahmini metodu (Källström & Åström, 1981; Zhou & Blanke, 1986), maksimum olasılık metodu (Åström & Källström, 1976) , sinir ağıları metodu (Haddara & Wang, 1999; Hess & Faller, 2001; Moreira & Guedes Soares, 2003; S. K. Bhattacharyya, 2006), destek vektör makineleri metodu (Weilin Luo, Guedes Soares, & Zou, 2016; WL Luo & Zou, 2009; Moreno-Salinas et al., 2013; Wang, Zou, Yu, & Cai, 2015; Zhang & Zou, 2011). Ayrıca çalışmamızda kullanılan iteratif hata tahmini metodu Ødegård tarafından oto pilot modelinde kullanılmıştır (Ødegård, 2009).

Duyarlılık analizi gemi manevra tahmininde kullanılan matematiksel modellerde yer alan hidrodinamik katsayıların etkilerini hesaplayabilmek adına önemlidir. Böylece önemsenmesi veya daha az önemsenmesi gereken büyüklüklerin belirlenmesi sağlanır. Bu durum matematiksel modellerin basitleştirilmesi açısından önemlidir. Tankerler, konteynır gemileri ve denizaltılar için duyarlılık analizi literatürde doğrudan ve doğrudan olmayan yöntemlerle gerçekleştirilmiştir. Hwang hidrodinamik katsayıların etkilerini hesaplayabilmek için Abkowitz modelini kullanarak Esso Osaka tankerinde dönme, zigzag $5^\circ/5^\circ$, zigzag $10^\circ/10^\circ$ ve zigzag $20^\circ/20^\circ$ manevralarında analizler gerçekleştirmiştir (Hwang, 1980). Rhee and Kim geleneksel manevra testleri dönme, zigzag $10^\circ/10^\circ$ ve zigzag $20^\circ/20^\circ$ yanı sıra 60° S-tip, 90° S-tip, 120° S-tip ve 180° S-tip testlerini de gerçekleştirmiş ve duyarlılık analizini Esso Osaka tankeri için Kijima denklemlerini kullanarak MMG modelinde yapmıştır. (Rhee & Kim, 1999). Wang ve arkadaşları duyarlılık analizini konteynır gemisi için dört serbestlik dereceli hareketinde doğrudan

metotla spiral testinde doğrudan olmayan metotla 120° S-tip testinde gerçekleştirdi (Wang, Zou, Xu, & Ren, 2014; Wang, Zou, Yang, & Xu, 2015).

Simman 2008 çalıştayında üç farklı tekne tipi tanker (KVLCC1-KVLCC2), konteynır (KCS) ve askeri tekne (DTMB 5415) üzerine manevra tahmini için çalışmalar yapılmıştır (Simman, 2008). Bu çalıştayda bu tekneler için farklı manevra tahmin metotları kullanılmıştır. Bu çalışmalara örnek verecek olursak Yoshimura ve arkadaşları KVLCC1,KVLCC2 ve KCS tekneleri için döner kol tekniğindeki deneysel verileri kullanarak MMG modelini uygulamışlardır ve matematiksel modelde yanıl tekne kuvveti ve savrulma momenti üçüncü derece polinom ile temsil edilmiştir (Yoshimura Yasuo, Ueno Michio, & Yoshiaki, 2008a). Ayrıca bir başka çalışmalarında KVLCC1 ve KVLCC2 teknelerinin dümen, dümen boynuzu ve pervane etkilerini farklı yükleme koşullarında incelemişlerdir (Yoshimura Yasuo, Ueno Michio, & Yoshiaki, 2008b). Sun Young ve Yeon Gyu aynı çalıştayda yatay düzlem mekanizma deneylerindeki verileri kullanarak MMG modeliyle performans tahmini gerçekleştirmişlerdir (Sun Young & Yeon Gyu, 2008). Otzen ve Agdrup Abkowitz benzeri bir matematiksel modeli tankerlerin manevra tahmini için test etmişlerdir (Otzen & Agdrup, 2008). Bunların dışında Yasukawa ve Yoshimura KVLCC2 teknesi için yanıl tekne kuvveti ve savrulma momentini üçüncü derece polinomla ifade edildiği MMG modelini uygulamıştır (Yasukawa & Yoshimura, 2015).

1.3. Amaç ve Kapsam

Sunulan tez çalışmasında üç serbestlik dereceli matematiksel modellerdeki hidrodinamik katsayılar ve ilgili parametreler hem deneysel hem de sistem tanımlama metotlarından birisi olan gri kutu yaklaşımıyla hesap edilerek simülasyonlar gerçekleştirilmiştir ve serbest model deneylerine en yakın matematiksel modelin elde edilmesi amaçlanmıştır.

Öncelikli olarak ilk kısımda Mariner teknesine ait 3 serbestlik dereceli Abkowitz modeli ele alınmıştır. Bu modele ait orijinal hidrodinamik katsayılar kullanılarak dört farklı 120° S-tip, dönme, zigzag $10^\circ/10^\circ$ ve zigzag $20^\circ/20^\circ$ simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Hidrodinamik katsayıların etkinliklerini belirleyebilmek için bu dört simülasyonda duyarlılık analizi yapılmıştır. Etkileri az olan hidrodinamik katsayılar çıkartılarak matematiksel modelde basitleştirme yapılmıştır. Basitleştirilen matematiksel modeller her

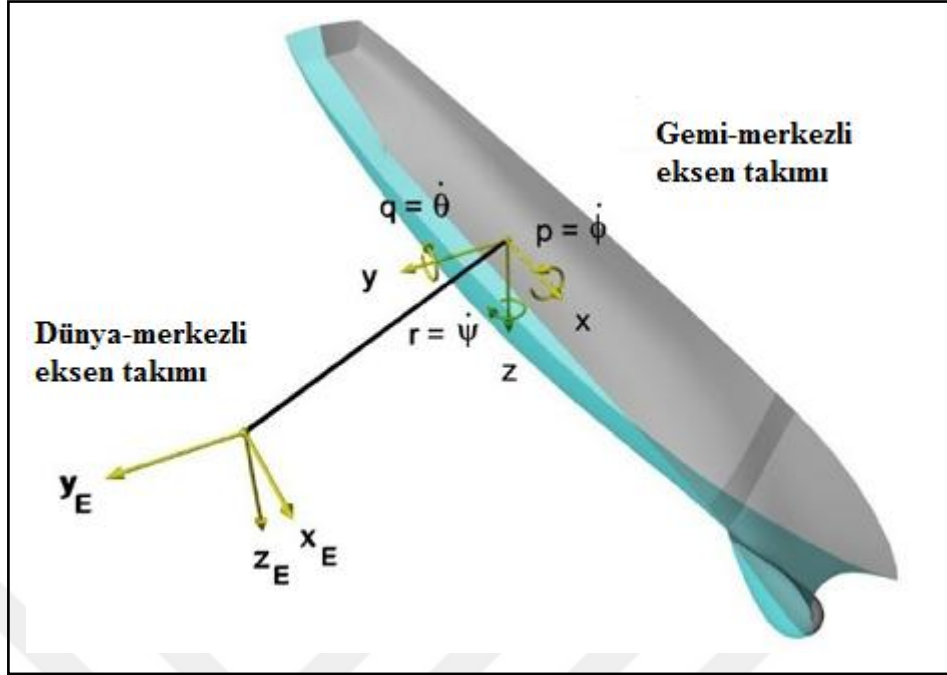
bir simülasyonda orijinal hareket parametreleriyle karşılaştırılmıştır. Sonrasında gri kutu metodu (hata tahminin minimizasyonu algoritması) yaklaşımıyla orijinal hareket parametreleri kullanılarak hem orijinal hem de basitleştirilmiş matematiksel modellerdeki hidrodinamik katsayılar yeniden tahmin edilmiştir. Tahmin edilen bu katsayıların kullanıldığı matematiksel modeller seçilmiş manevra simülasyonların orijinal verileriyle karşılaştırılmıştır. Böylelikle asıl hedeflerden birisi olan gri kutu metodunun performansının değerlendirilmesi yapılmıştır.

İkinci kısımda farklı kıç formlarına sahip olan KVLCC1 ve KVLCC2 iki tanker gemisinin manevra performansları sistem temelli metoda dayalı olarak tahmin edilmiştir. Yanal kuvvetin ve savrulma momentinin ikinci ve üçüncü derece polinomlarla yazılması suretiyle, MMG (Manevra Modelleme Grubu), Abkowitz ve Blanke konseptlerine dayalı toplamda altı farklı üç serbestlik dereceli matematiksel model her bir tekne için uygulanmıştır. Bu matematiksel modellerdeki hidrodinamik katsayıları ve ilgili parametreler farklı ölçekteki modellerle yapılmış farklı türdeki NMRI (Uluslararası Denizcilik Araştırma Enstitüsü) ve MOERI (Denizcilik ve Okyanus Mühendisliği Araştırma Enstitüsü) deneysel verileri kullanılarak tahmin edilmiştir. Elde edilen matematiksel modellerle dümen açısı $\pm 35^\circ$ ile dönme, zigzag ($\pm 10^\circ/\pm 10^\circ$) ve zigzag ($\pm 20^\circ/\pm 20^\circ$) manevra simülasyonları gerçekleştirilmiş ve MARIN'ın (Hollanda Denizcilik Araştırma Enstitüsü) serbest model deney verileri ile karşılaştırılma yapılmıştır. Serbest model deney verileri kullanılarak gri kutu yaklaşımıyla hidrodinamik katsayılar ve ilgili parametreler yeniden tahmin edilmiştir. Bu yeni değerlerle birlikte simülasyonlar yeniden yapılarak matematiksel modellerde iyileştirme yapılmıştır.

1.4. Hareket Denklemleri

1.4.1. Altı Serbestlik Dereceli Hareket Denklemleri

Geminin manevra karakteristiklerinin belirlenmesi için iki eksen takımının belirlenmesi gerekir. Bu amaçla öncelikle Şekil 3'teki gibi dünya ve gemi bazlı iki eksen takımı tanımlamak gerekmektedir. Gemi merkezli eksen takımı tekneye sabitlenmiş, orijini tekne orta noktasında yer alan hareketli eksen takımıdır. x, y ve z eksenleri sırasıyla boyuna, yanal ve düşey eksen bileşenlerini temsil etmektedir.



Şekil 3. Dünya merkezli ve gemi merkezli eksen takımları (H. Yoon, 2009)

Tablo 1’de görüleceği üzere gemiye x yönünde etkiyen boyuna öteleme (surge) kuvvet bileşeni X ile, y yönünde etkiyen yanal öteleme (sway) kuvvet bileşeni Y ile, z yönünde etkiyen dalıp çıkma (heave) kuvvet bileşeni Z ile, x eksenini etrafındaki yalpa (roll) moment bileşeni K ile, y eksenini etrafındaki baş kık vurma (pitch) moment bileşeni M ile, z eksenini etrafındaki savrulma (yaw) moment bileşeni N ile gösterilmektedir.

Tablo 1. x , y ve z yönlerindeki hareket, hız ve kuvvet/moment bileşenleri

Serbestlik derecesi	Hareket bileşeni	Eksen	Kuvvet/Moment bileşeni	Hız bileşeni
1	Boyuna öteleme (Surge)	x	X	u
2	Yanal öteleme (Sway)	y	Y	v
3	Dalıp çıkma (Heave)	z	Z	w
4	Yalpa (Roll)	ϕ	K	p
5	Baş kık vurma (Pitch)	θ	M	q
6	Savrulma (Yaw)	ψ	N	r

m geminin kütlelerini ve I_x, I_y, I_z x, y ve z yönündeki kütle atalet momentlerini temsil etmektedir. x_G, y_G, z_G ağırlık merkezinin koordinatlarını; u, v, w boyuna öteleme, yanal öteleme ve dalıp çıkma hız bileşenlerini ($\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$); $\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}$ boyuna öteleme, yanal öteleme ve dalıp çıkma ivme bileşenlerini ($\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$); p, q, r yalpa, baş kık vurma ve savrulma hızlarını ($\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}$) ve $\dot{p}, \dot{q}, \dot{r}$ yalpa, baş kık vurma ve savrulma ivmelerini ($\ddot{\phi}, \ddot{\theta}, \ddot{\psi}$) temsil etmektedir.

Altı serbestlik dereceli rijit bir cismin kendi ağırlık merkezine göre Newton hareket denklemi aşağıdaki gibidir:

$$\vec{F} = m \frac{d\vec{V}_G}{dt}; \quad \vec{M}_G = I_G \frac{d\vec{\Omega}}{dt} \quad (1)$$

Burada;

m : Cismin kütlesi

$\vec{V}_G$: Ağırlık merkezindeki hız vektörü

I_G : Kütle atalet momenti

$\vec{\Omega}$: Açısal hız vektörü

$\vec{\Omega} : p\vec{i} + q\vec{j} + r\vec{k}$

şeklindedir.

Orijin noktası sabit olan dönen cisimde, sabit yarıçap vektörünün zamana göre değişimi dönme hız vektörü, $\vec{\Omega}$, yarıçap vektörü, $\vec{R}_G$ 'nin vektörel çarpımıdır. Bileşke türev hareketli cisim eksenindedir. Bu durumda yarıçap vektörü cismin eksenine göre değiştiği için ek bir terime ihtiyaç vardır:

$$\vec{V}_G = \vec{V} + \vec{\Omega} \times \vec{R}_G \quad (2)$$

Burada;

$\vec{V}$: Cismin orijinindeki hız vektörü

$\vec{V} : u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$

$\vec{R}_G : x_G\vec{i} + y_G\vec{j} + z_G\vec{k}$

şeklindedir.

Bu ifadelerin yerine konması ile aşağıdaki kuvvet ifadesi elde edilir:

$$\vec{F} = m \frac{d\vec{V}_G}{dt} = m \frac{d}{dt} (\vec{V} + \vec{\Omega} \times \vec{R}_G) \quad (3)$$

$$\vec{F} = m \left(\frac{d\vec{V}}{dt} + \vec{\Omega} \times \vec{V} + \frac{d\vec{\Omega}}{dt} \times \vec{R}_G + \vec{\Omega} \times \frac{d\vec{R}_G}{dt} \right) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{V}}{dt} + \vec{\Omega} \times \vec{V} &= \dot{u}\vec{i} + \dot{v}\vec{j} + \dot{w}\vec{k} + \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ p & q & r \\ u & v & w \end{vmatrix} \\ &= (\dot{u} + wq - vr)\vec{i} + (\dot{v} + ur - wp)\vec{j} + (\dot{w} + vp - uq)\vec{k} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{d\vec{\Omega}}{dt} \times \vec{R}_G = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \dot{p} & \dot{q} & \dot{r} \\ x_G & y_G & z_G \end{vmatrix} = (z_G\dot{q} - y_G\dot{r})\vec{i} + (x_G\dot{r} - z_G\dot{p})\vec{j} + (y_G\dot{p} - x_G\dot{q})\vec{k} \quad (6)$$

$$\frac{d\vec{R}_G}{dt} = \vec{\Omega} \times \vec{R}_G = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ p & q & r \\ x_G & y_G & z_G \end{vmatrix} = (z_Gq - y_Gr)\vec{i} + (x_Gr - z_Gp)\vec{j} + (y_Gp - x_Gq)\vec{k} \quad (7)$$

$$\vec{\Omega} \times \frac{d\vec{R}_G}{dt} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ p & q & r \\ z_Gq - y_Gr & x_Gr - z_Gp & y_Gp - x_Gq \end{vmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \vec{\Omega} \times \frac{d\vec{R}_G}{dt} &= (y_Gpq - x_Gq^2 - x_Gr^2 + z_Gpr)\vec{i} + (z_Gqr - y_Gr^2 - y_Gp^2 + x_Gpq)\vec{j} \\ &\quad + (x_Gpr - z_Gp^2 - z_Gq^2 + y_Gqr)\vec{k} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\vec{F} = m \left(\frac{d\vec{V}}{dt} + \vec{\Omega} \times \vec{V} + \frac{d\vec{\Omega}}{dt} \times \vec{R}_G + \vec{\Omega} \times \frac{d\vec{R}_G}{dt} \right) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \vec{F} = m & \left(\dot{u} + wq - vr + z_G \dot{q} - y_G \dot{r} + y_G pq - x_G q^2 - x_G r^2 + z_G pr \right) \vec{i} \\ & + m \left(\dot{v} + ur - wp + x_G \dot{r} - z_G \dot{p} + z_G qr - y_G r^2 - y_G p^2 + x_G pq \right) \vec{j} \\ & + m \left(\dot{w} + vp - uq + y_G \dot{p} - x_G \dot{q} + x_G pr - z_G p^2 - z_G q^2 + y_G qr \right) \vec{k} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \vec{F} = m & \left[\dot{u} + wq - vr - x_G (q^2 + r^2) + y_G (pq - \dot{r}) + z_G (pr + \dot{q}) \right] \vec{i} \\ & + m \left[\dot{v} + ur - wp - y_G (p^2 + r^2) + z_G (qr - \dot{p}) + x_G (pq + \dot{r}) \right] \vec{j} \\ & + m \left[\dot{w} + vp - uq - z_G (p^2 + q^2) + x_G (pr - \dot{q}) + y_G (qr + \dot{p}) \right] \vec{k} \end{aligned} \quad (12)$$

veya

$$X = m \left[\dot{u} + wq - vr - x_G (q^2 + r^2) + y_G (pq - \dot{r}) + z_G (pr + \dot{q}) \right] \quad (13)$$

$$Y = m \left[\dot{v} + ur - wp - y_G (p^2 + r^2) + z_G (qr - \dot{p}) + x_G (pq + \dot{r}) \right] \quad (14)$$

$$Z = m \left[\dot{w} + vp - uq - z_G (p^2 + q^2) + x_G (pr - \dot{q}) + y_G (qr + \dot{p}) \right] \quad (15)$$

Moment ifadesi de benzer bir yaklaşımla aşağıdaki gibi çıkarılabilir:

$$\vec{M} = \vec{M}_G + \vec{R}_G \times \vec{F} = I_G \frac{d\vec{\Omega}}{dt} + \vec{R}_G \times \vec{F} \quad (16)$$

$$\vec{M} = I_{xxG} \dot{p} \vec{i} + I_{yyG} \dot{q} \vec{j} + I_{zzG} \dot{r} \vec{k} + \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ x_G & y_G & z_G \\ X & Y & Z \end{vmatrix} \quad (17)$$

$$\vec{M} = (I_{xxG}\dot{p} + Zy_G - Yz_G)\vec{i} + (I_{yyG}\dot{q} + Xz_G - Zx_G)\vec{j} + (I_{zzG}\dot{r} + Yx_G - Xy_G)\vec{k} \quad (18)$$

$$K = I_{xxG}\dot{p} + Zy_G - Yz_G \quad (19)$$

$$M = I_{yyG}\dot{q} + Xz_G - Zx_G \quad (20)$$

$$N = I_{zzG}\dot{r} + Yx_G - Xy_G \quad (21)$$

Burada daha önce çıkarılan X, Y ve Z ifadeleri kullanılarak yalpa momenti aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{aligned} K = I_{xxG}\dot{p} + my_G(\dot{w} + vp - uq) - my_Gz_Gp^2 - my_Gz_Gq^2 + mx_Gy_Gpr - mx_Gy_G\dot{q} \\ + my_G^2qr + my_G^2\dot{p} - mz_G(\dot{v} + ur - wp) + my_Gz_Gp^2 + my_Gz_Gr^2 - mz_G^2qr + mz_G^2\dot{p} \\ - mx_Gz_Gpq - mx_Gz_G\dot{r} \end{aligned} \quad (22)$$

Bu ifade aşağıdaki gibi düzenlenebilir:

$$\begin{aligned} K = [I_{xxG} + m(y_G^2 + z_G^2)]\dot{p} - mx_Gy_G(\dot{q} - pr) - mx_Gz_G(\dot{r} + pq) - my_Gz_G(q^2 - r^2) \\ - (mz_G^2 - my_G^2)qr + m[y_G(\dot{w} + vp - uq) - z_G(\dot{v} + ur - wp)] \end{aligned} \quad (23)$$

Paralel eksen teoremine göre eylemsizlik ve çarpım eylemsizlik momentleri aşağıdaki gibidir:

$$I_{xxG} = I_{xx} - m(y_G^2 + z_G^2) \quad (24)$$

$$I_{yyG} = I_{yy} - m(x_G^2 + z_G^2) \quad (25)$$

$$I_{zzG} = I_{zz} - m(x_G^2 + y_G^2) \quad (26)$$

$$I_{XYG} = I_{XY} + m x_G y_G = 0 \quad \Rightarrow \quad m x_G y_G = -I_{XY} \quad (27)$$

$$I_{XZG} = I_{XZ} + m x_G z_G = 0 \quad \Rightarrow \quad m x_G z_G = -I_{XZ} \quad (28)$$

$$I_{YZG} = I_{YZ} + m y_G z_G = 0 \quad \Rightarrow \quad m y_G z_G = -I_{YZ} \quad (29)$$

Bu terimleri yerine konması ile yalpa momenti aşağıdaki gibi olur:

$$K = I_{XX} \dot{p} + I_{XY} (\dot{q} - pr) + I_{XZ} (\dot{r} + pq) + I_{YZ} (q^2 - r^2) + (I_{ZZ} - I_{YY}) qr + m [y_G (\dot{w} + vp - uq) - z_G (\dot{v} + ur - wp)] \quad (30)$$

Benzer şekilde baş kıkırma ve savrulma momentleri aşağıdaki gibidir:

$$M = I_{YY} \dot{q} + I_{YZ} (\dot{r} - qp) + I_{YX} (\dot{p} + qr) + I_{ZX} (r^2 - p^2) + (I_{XX} - I_{ZZ}) pr + m [z_G (\dot{u} + wq - rv) - x_G (\dot{w} + vp - uq)] \quad (31)$$

$$N = I_{ZZ} \dot{r} + I_{ZX} (\dot{p} - qr) + I_{ZY} (\dot{q} + pr) + I_{XY} (p^2 - q^2) + (I_{YY} - I_{XX}) pq + m [x_G (\dot{v} + ur - pw) - y_G (\dot{u} + wq - vr)] \quad (32)$$

Buradaki I_{XX} , I_{YY} ve I_{ZZ} kütle atalet momentlerini temsil etmektedir.

$$I_{XX} = \sum_{i=1}^N m_i (y_i^2 + z_i^2) \quad (33)$$

$$I_{YY} = \sum_{i=1}^N m_i (x_i^2 + z_i^2) \quad (34)$$

$$I_{ZZ} = \sum_{i=1}^N m_i (x_i^2 + y_i^2) \quad (35)$$

Çarpım kütle atalet momentleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$I_{XY} = I_{YX} = -\sum_{i=1}^N m_i x_i y_i \quad (36)$$

$$I_{XZ} = I_{ZX} = -\sum_{i=1}^N m_i x_i z_i \quad (38)$$

$$I_{YZ} = I_{ZY} = -\sum_{i=1}^N m_i y_i z_i \quad (39)$$

1.4.2. Üç Serbestlik Dereceli Hareket Denklemleri

Gemi manevra problemlerinde geminin sonsuz, sakin ve derin suda yüzdüğü kabul edilmektedir. Ayrıca genel olarak dalıp çıkma, yalpa ve baş kıkırma hareketleri göz ardı edilmektedir. Böylece dalıp çıkma, yalpa ve baş kıkırma hareketlerine ait hız ve ivme değerleri ortadan kalkacaktır:

$$w = p = q = \dot{w} = \dot{p} = \dot{q} = 0 \quad (40)$$

Cismin x-z düzlemine göre (sancak-iskele) simetrik olduğu kabul edilirse:

$$y_G = 0 \quad (41)$$

olur. Bu durumda yukarıda çıkarılan altı serbestlik dereceli hareketler aşağıdaki gibi üç serbestlik dereceli bir denklem takımı ile ifade edilebilecektir. Böylece yatay düzlemdeki hareketleri içeren boyuna öteleme (x), yanal öteleme (y) ve savrulma (ψ) denklemleri aşağıdaki gibidir:

$$X = m(\ddot{u} - vr - x_G r^2) \quad (42)$$

$$Y = m(\dot{v} + ur + x_G \dot{r}) \quad (43)$$

$$N = I_{zz} \dot{r} + mx_G (\dot{v} + ur) \quad (44)$$

Burada denklemin sol tarafında yer alan X, Y, N dış kuvvetler ve moment bileşenleri tekne hidrodinamik kuvvetleri ve dümen kuvvetlerini ve pervane kuvvetlerini kapsayan kontrol yüzey kuvvetlerini içermektedir (Sarıöz, 2010).

1.5. Matematiksel Modeller

1.5.1. Abkowitz Modeli

Abkowitz tarafından geliştirilen modelde kuvvet ve moment büyüklükleri geminin hız, ivme ve dümen açısı büyüklüklerinin fonksiyonu olarak düşünülmektedir (M.A. Abkowitz, 1964).

$$\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ N \end{Bmatrix} = f(u, v, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{r}, \delta) \quad (45)$$

Bu modelde Taylor serisini 3. mertebeye açarak kullanmayı hedeflemiştir. Çünkü deneyimler üçüncü dereceden yüksek terimlerin etkilerinin önemli olmadığını göstermektedir.

Taylor açılımı sabit hızla (U) doğrusal bir rota üzerinde yol alan bir gemi için aşağıdaki başlangıç değerleri ile uygulanabilir:

$$u_0 = U; v_0 = 0; r_0 = 0 \quad \dot{u}_0 = 0; \dot{v}_0 = 0; \dot{r}_0 = 0 \quad \delta_0 = 0 \quad (46)$$

X yönündeki kuvvet bileşeni için 3. dereceye kadar Taylor serisi açılıp ivme terimlerinin 2. derece ve daha yüksek derecedeki terimleri ile hız ve ivme terimlerinin çarpımları göz ardı edildiğinde aşağıdaki kuvvet büyüklüğü elde edilmiş olur:

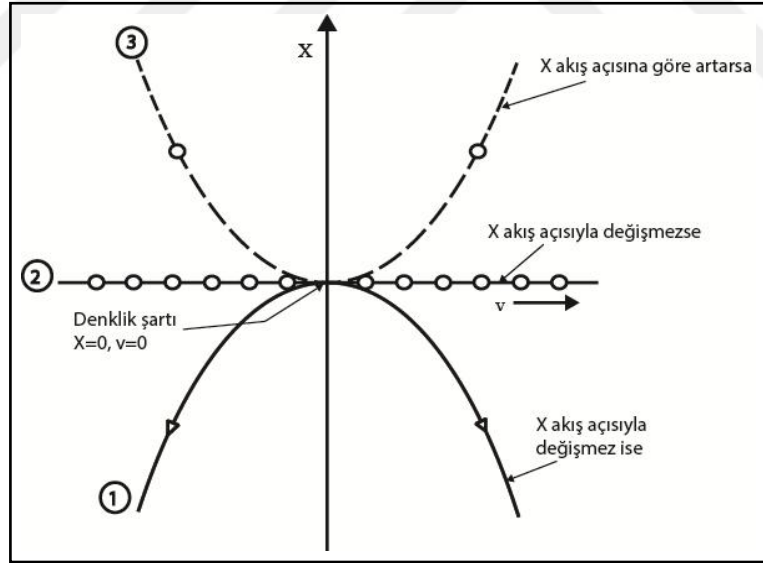
$$\begin{aligned}
 X &= X^0 \\
 &+ X_u \Delta U + X_v v + X_r r + X_u \dot{u} + X_v \dot{v} + X_r \dot{r} + X_\delta \delta \\
 &+ \frac{1}{2!} \left[\begin{aligned} &X_{uu} \Delta U^2 + X_{vv} v^2 + X_{rr} r^2 + X_{\delta\delta} \delta^2 \\ &2X_{uv} \Delta U v + 2X_{ur} \Delta U r + 2X_{u\delta} \Delta U \delta \\ &2X_{vr} v r + 2X_{v\delta} v \delta + 2X_{r\delta} r \delta \end{aligned} \right] \\
 &+ \frac{1}{3!} \left[\begin{aligned} &X_{uuu} \Delta U^3 + X_{vvv} v^3 + X_{rrr} r^3 + X_{\delta\delta\delta} \delta^3 \\ &+ 3X_{uuv} \Delta U^2 v + 3X_{uur} \Delta U^2 r + 3X_{u\delta\delta} \Delta U^2 \delta \\ &+ 3X_{uvv} \Delta U v^2 + 3X_{urr} \Delta U r^2 + 3X_{u\delta\delta} \Delta U \delta^2 \\ &+ 3X_{vvr} v^2 r + 3X_{v\delta\delta} v^2 \delta + 3X_{vrr} v r^2 + 3X_{v\delta\delta} v \delta^2 \\ &+ 3X_{r\delta\delta} r \delta^2 + 3X_{rr\delta} \delta r^2 + 6X_{uvr} \Delta U v r \\ &+ 6X_{uv\delta} \Delta U v \delta + 6X_{ur\delta} \Delta U r \delta + 6X_{vr\delta} v r \delta \end{aligned} \right]
 \end{aligned} \tag{47}$$

Benzer şekilde Y kuvveti ve N momenti aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{aligned}
 Y &= Y^0 \\
 &+ Y_u \Delta U + Y_v v + Y_r r + Y_u \dot{u} + Y_v \dot{v} + Y_r \dot{r} + Y_\delta \delta \\
 &+ \frac{1}{2!} \left[\begin{aligned} &Y_{uu} \Delta U^2 + Y_{vv} v^2 + Y_{rr} r^2 + Y_{\delta\delta} \delta^2 \\ &2Y_{uv} \Delta U v + 2Y_{ur} \Delta U r + 2Y_{u\delta} \Delta U \delta \\ &2Y_{vr} v r + 2Y_{v\delta} v \delta + 2Y_{r\delta} r \delta \end{aligned} \right] \\
 &+ \frac{1}{3!} \left[\begin{aligned} &Y_{uuu} \Delta U^3 + Y_{vvv} v^3 + Y_{rrr} r^3 + Y_{\delta\delta\delta} \delta^3 \\ &+ 3Y_{uuv} \Delta U^2 v + 3Y_{uur} \Delta U^2 r + 3Y_{u\delta\delta} \Delta U^2 \delta \\ &+ 3Y_{uvv} \Delta U v^2 + 3Y_{urr} \Delta U r^2 + 3Y_{u\delta\delta} \Delta U \delta^2 \\ &+ 3Y_{vvr} v^2 r + 3Y_{v\delta\delta} v^2 \delta + 3Y_{vrr} v r^2 + 3Y_{v\delta\delta} v \delta^2 \\ &+ 3Y_{r\delta\delta} r \delta^2 + 3Y_{rr\delta} \delta r^2 + 6Y_{uvr} \Delta U v r \\ &+ 6Y_{uv\delta} \Delta U v \delta + 6Y_{ur\delta} \Delta U r \delta + 6Y_{vr\delta} v r \delta \end{aligned} \right]
 \end{aligned} \tag{48}$$

$$\begin{aligned}
N &= N^0 \\
&+ N_u \Delta U + N_v v + N_r r + N_{\dot{u}} \dot{u} + N_{\dot{v}} \dot{v} + N_{\dot{r}} \dot{r} + N_{\delta} \delta \\
&+ \frac{1}{2!} \left[\begin{aligned} &N_{uu} \Delta U^2 + N_{vv} v^2 + N_{rr} r^2 + N_{\delta\delta} \delta^2 \\ &2N_{uv} \Delta U v + 2N_{ur} \Delta U r + 2N_{u\delta} \Delta U \delta \\ &2N_{vr} v r + 2N_{v\delta} v \delta + 2N_{r\delta} r \delta \end{aligned} \right] \\
&+ \frac{1}{3!} \left[\begin{aligned} &N_{uuu} \Delta U^3 + N_{vvv} v^3 + N_{rrr} r^3 + N_{\delta\delta\delta} \delta^3 \\ &+ 3N_{uuv} \Delta U^2 v + 3N_{uur} \Delta U^2 r + 3N_{u\delta\delta} \Delta U^2 \delta \\ &+ 3N_{uvv} \Delta U v^2 + 3N_{urr} \Delta U r^2 + 3N_{u\delta\delta} \Delta U \delta^2 \\ &+ 3N_{vvr} v^2 r + 3N_{vv\delta} v^2 \delta + 3N_{vrr} v r^2 + 3N_{v\delta\delta} v \delta^2 \\ &+ 3N_{r\delta\delta} r \delta^2 + 3N_{rr\delta} r \delta r^2 + 6N_{uvr} \Delta U v r \\ &+ 6N_{uv\delta} \Delta U v \delta + 6N_{ur\delta} \Delta U r \delta + 6N_{vr\delta} v r \delta \end{aligned} \right]
\end{aligned} \tag{49}$$

Geminin x-z düzlemindeki geometrik simetrisi neticesinde boyuna kuvvet ile yanıl hız arasındaki ilişki aşığıdaki Şekil 4'te açıklanmıştır:



Şekil 4. X ile v arasındaki üç olası durum (Lewis, 1989)

Şekil 4'te görüleceği üzere her üç durumda da x ordinatı göz önüne alındığında bir simetri durumu söz konusudur. Eğer X ile v arasındaki ilişki 1 veya 3 no'lu eğride gösterildiği gibi ise ifadede yalnızca v'nin çift kuvvetleri yer alır ve tekil kuvvetlerin katsayıları sıfır olmalıdır.

$$X(v) = a_2 v^2 + a_4 v^4 + a_6 v^6 + \dots \quad (50)$$

$$a_2 = 1/2 X_{vv}; a_4 = 1/24 X_{vvv}$$

Abkowitz, x-z düzleminin simetrisi sonucu olarak X kuvvetini $r, \delta, \dot{v}, \dot{r}$ değişkenlerinin çift fonksiyonu olarak göstermiştir:

$$X(r) = b_2 r^2 + b_4 r^4 + b_6 r^6 + \dots$$

$$X(\delta) = c_2 \delta^2 + c_4 \delta^4 + c_6 \delta^6 + \dots \quad (51)$$

Bu bilgiler ışığında sancak iskele simetrisi olan gemilerde boyuna öteleme kuvvetinin yanal öteleme, savrulma hızı ve dümen açısına bağlı değişimlerinin tekil kuvvetleri sıfır olacaktır.

$$X_v = 0; X_{\dot{v}} = 0; X_r = 0; X_{\dot{r}} = 0; X_{\delta} = 0$$

$$X_{uv} = 0; X_{ur} = 0; X_{u\delta} = 0 \quad (52)$$

$$X_{vvv} = 0; X_{rrr} = 0; X_{\delta\delta\delta} = 0; X_{uuv} = 0; X_{uur} = 0; X_{uu\delta} = 0$$

$$X_{vvr} = 0; X_{vrr} = 0; X_{vv\delta} = 0; X_{v\delta\delta} = 0; X_{r\delta\delta} = 0; X_{rr\delta} = 0; X_{vr\delta} = 0$$

X kuvvetinin aksine Y kuvveti ve N momenti $v, r, \delta, \dot{v}, \dot{r}$ değişkenlerinin tekil fonksiyonudur. Bu durum tekil kuvvetleri sıfır, çift kuvvetleri ise sıfırdan farklı yapar.

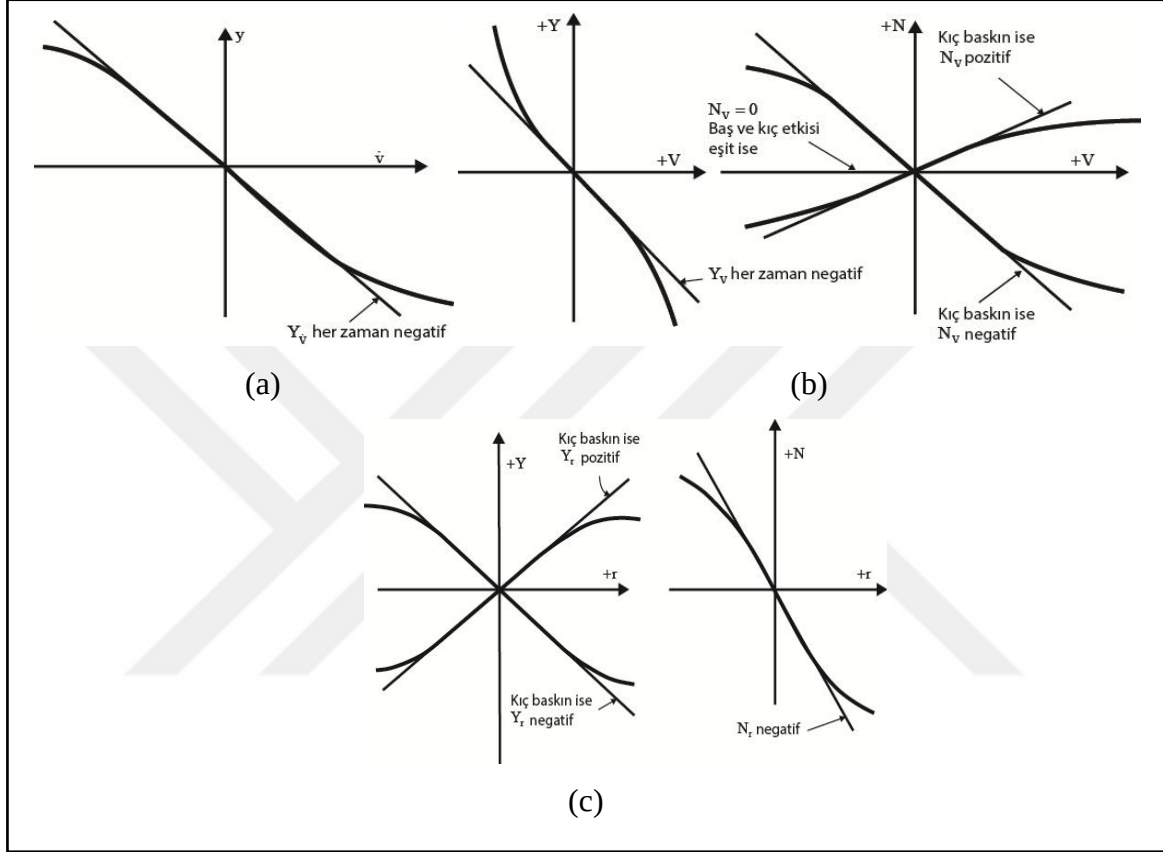
Tekil fonksiyonlar Şekil 5'te görüldüğü gibidir ve bütün durumlarda fonksiyonun grafiği orijinden geçmektedir. Y kuvveti ve N momenti $v, r, \delta, \dot{v}, \dot{r}$ değişkenlerinin tekil fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi gösterilmiştir:

$$Y(v) = d_1 v + d_3 v^3 + d_5 v^5 + \dots$$

$$Y(\delta) = e_1 \delta + e_3 \delta^3 + e_5 \delta^5 + \dots \quad (53)$$

Sonuç olarak yanal kuvvet (Y) ve savrulma momenti (N)'nin yanal öteleme ve savrulma hızlarına bağlı değişimlerinin çift kuvvetleri sıfır olacaktır.

$$\begin{aligned}
Y_{vv} &= 0; Y_{rr} = 0; Y_{\delta\delta} = 0; Y_{vr} = 0; Y_{v\delta} = 0; Y_{r\delta} = 0 \\
Y_{uvv} &= 0; Y_{urr} = 0; Y_{u\delta\delta} = 0; Y_{uvr} = 0; Y_{uv\delta} = 0; Y_{ur\delta} = 0 \\
N_{vv} &= 0; N_{rr} = 0; N_{\delta\delta} = 0; N_{vr} = 0; N_{v\delta} = 0; N_{r\delta} = 0 \\
N_{uvv} &= 0; N_{urr} = 0; N_{u\delta\delta} = 0; N_{uvr} = 0; N_{uv\delta} = 0; N_{ur\delta} = 0
\end{aligned} \tag{54}$$



Şekil 5. (a) Y ile $\dot{v}$ arasındaki ilişki, (b) Y ile v ve N ile v arasındaki ilişki, (c) Y ile r ve N ile r arasındaki ilişki (Lewis, 1989)

Ayrıca x-z düzleminin simetrisinden dolayı boyuna öteleme ile yanal kuvvet ve savrulma momenti arasındaki ilişki ve türev değerleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned}
Y(u) &= 0; N(u) = 0 \\
Y_u &= 0; Y_{uu} = 0; Y_{uuu} = 0; Y_{\ddot{u}} = 0 \\
N_u &= 0; N_{uu} = 0; N_{uuu} = 0; N_{\ddot{u}} = 0;
\end{aligned} \tag{55}$$

Tek pervanenin dönmesi veya çoklu pervanelerin aynı yönde dönmesinden kaynaklanan Y kuvveti ve N momenti $v = \delta = 0$ için non-lineer denklemde Y^0 ve N^0

şeklinde yer alır. Bununla birlikte Y^0 ve N^0 muhtemelen hıza bağlıdır ve Taylor serisinde aşağıdaki terimler sıfırdan farklıdır:

$$\begin{aligned} Y_u^0 \Delta U \neq 0; Y_{uu}^0 \Delta U^2 \neq 0 \\ N_u^0 \Delta U \neq 0; N_{uu}^0 \Delta U^2 \neq 0 \end{aligned} \quad (56)$$

Pervaneden kaynaklanan $v \neq 0$ için Y kuvveti ve N momenti de hıza bağlıdır ve Taylor serisinde yer alan terimler sıfırdan farklıdır.

$$\begin{aligned} Y_{uv} \Delta U v \neq 0; Y_{uuv} \Delta U^2 v \neq 0 \\ N_{uv} \Delta U v \neq 0; N_{uuv} \Delta U^2 v \neq 0 \end{aligned} \quad (57)$$

Sonuç olarak X , Y kuvvetleri ve N momenti aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$\begin{aligned} X = X^0 + X_u \Delta U + X_{\dot{u}} \dot{u} + \frac{1}{2} X_{uu} \Delta U^2 + \frac{1}{2} X_{vv} v^2 + \frac{1}{2} X_{rr} r^2 + \frac{1}{2} X_{\delta\delta} \delta^2 + X_{vr} vr \\ + X_{v\delta} v\delta + X_{r\delta} r\delta + \frac{1}{6} X_{uuu} \Delta U^3 + \frac{1}{2} X_{uuv} \Delta U v^2 + \frac{1}{2} X_{uur} \Delta U r^2 \\ + \frac{1}{2} X_{u\delta\delta} \Delta U \delta^2 + X_{uvr} \Delta U vr + X_{uv\delta} \Delta U v\delta + X_{ur\delta} \Delta U r\delta \end{aligned} \quad (58)$$

$$\begin{aligned} Y = Y^0 + Y_u^0 \Delta U + Y_{uu}^0 \Delta U^2 + Y_v v + Y_r r + Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{\dot{r}} \dot{r} + Y_{\delta} \delta + Y_{uv} \Delta U v \\ + Y_{ur} \Delta U r + Y_{u\delta} \Delta U \delta + \frac{1}{6} Y_{vvv} v^3 + \frac{1}{6} Y_{rrr} r^3 + \frac{1}{6} Y_{\delta\delta\delta} \delta^3 + \frac{1}{2} Y_{uuv} \Delta U^2 v \\ + \frac{1}{2} Y_{uur} \Delta U^2 r + \frac{1}{2} Y_{uu\delta} \Delta U^2 \delta + \frac{1}{2} Y_{vvr} v^2 r + \frac{1}{2} Y_{vv\delta} v^2 \delta + \frac{1}{2} Y_{vrr} vr^2 \\ + \frac{1}{2} Y_{v\delta\delta} v\delta^2 + \frac{1}{2} Y_{r\delta\delta} r\delta^2 + \frac{1}{2} Y_{rr\delta} \delta r^2 + Y_{vr\delta} vr\delta \end{aligned} \quad (59)$$

$$\begin{aligned} N = N^0 + N_u^0 \Delta U + N_{uu}^0 \Delta U^2 + N_v v + N_r r + N_{\dot{v}} \dot{v} + N_{\dot{r}} \dot{r} + N_{\delta} \delta + N_{uv} \Delta U v \\ + N_{ur} \Delta U r + N_{u\delta} \Delta U \delta + \frac{1}{6} N_{vvv} v^3 + \frac{1}{6} N_{rrr} r^3 + \frac{1}{6} N_{\delta\delta\delta} \delta^3 + \frac{1}{2} N_{uuv} \Delta U^2 v \\ + \frac{1}{2} N_{uur} \Delta U^2 r + \frac{1}{2} N_{uu\delta} \Delta U^2 \delta + \frac{1}{2} N_{vvr} v^2 r + \frac{1}{2} N_{vv\delta} v^2 \delta + \frac{1}{2} N_{vrr} vr^2 \\ + \frac{1}{2} N_{v\delta\delta} v\delta^2 + \frac{1}{2} N_{r\delta\delta} r\delta^2 + \frac{1}{2} N_{rr\delta} \delta r^2 + N_{vr\delta} vr\delta \end{aligned} \quad (60)$$

1.5.2. Blanke Modeli

1981 yılında Blanke tarafından geliştirilen modelde dümen kontrolü ve sevk kayıpları için en önemli terimleri göz önünde tutarak basitleştirilmiş model geliştirmiştir (Blanke, 1981). Sonuç olarak X doğrultusundaki denklem aşağıdaki gibi yazılır:

$$(m - X_{\dot{u}}) = X_{|u|u} |u| u + (1 - t_p) T + T_{kayıp} \quad (61)$$

Burada kayıp terimleri

$$T_{kayıp} = (m + X_{vr}) vr + (mx_G + X_{rr}) r^2 + X_{\delta\delta} \delta^2 + X_{ext} \quad (62)$$

şeklindedir. Blanke bu basitleştirmeye ek olarak $X_{\dot{u}}$ ve $(mx_G + X_{rr})$ terimleri pek çok gemi için oldukça küçük olduğundan sıfır olarak kabul etmiştir. Aslında $X_{\dot{u}}$ terimi genellikle gemi kütlesinin %5'inden daha küçüktür. Savrulma hızının karesiyle çarpılan son terim ise dönüş hızı $r_{max} = 1(\text{derece/s}) = 0.0175(\text{rad/s})$ sınırlı bir gemi için $0.0003(\text{rad/s}^2)$ den küçük olacaktır. Blanke modelinde yanal ve savrulma hareket denklemi aşağıdaki gibi yazılmıştır:

$$\begin{aligned} (m - Y_{\dot{v}}) \dot{v} + (mx_G - Y_{\dot{r}}) \dot{r} = \\ - (m - Y_{ur}) ur + Y_{uv} uv + Y_{|v|v} |v| v + Y_{|v|r} |v| r + Y_{\delta\delta} \delta + Y_{ext} \\ (mx_G - N_{\dot{v}}) \dot{v} + (I_{zz} - N_{\dot{r}}) \dot{r} = \\ - (mx_G - N_{ur}) ur + N_{uv} uv + N_{|v|v} |v| v + N_{|v|r} |v| r + N_{\delta\delta} \delta + N_{ext} \end{aligned} \quad (63)$$

1.5.3. Manevra Modelleme Grubu (MMG) Modeli

Bu model Japonya Çekme Tankı Komitesinin alt komitesi olan manevra komitesi tarafından yeni bir matematiksel model olarak sunulmuştur (Ogawa A & H, 1978). MMG matematiksel modelde hidrodinamik kuvvetler, tekne, pervane ve dümenin katkılarıyla karakterize edilir. Her bir elemanın ifadesi ayrı ayrı karakteristikleri ve üç farklı gemi

bileşenin etkileşimi temeline dayanır. Sonuç olarak kuvvet ve moment büyüklükleri aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:

$$\begin{aligned} X &= X_H + X_p + X_R \\ Y &= Y_H + Y_p + Y_R \\ N &= N_H + N_p + N_R \end{aligned} \quad (64)$$

1.5.3.1. Tekne Hidrodinamik Kuvvetleri ve Momenti

Tekne kuvvetleri ve momenti hız ve ivme bileşenlerinin fonksiyonu olarak ifade edilebilir. İdeal akış denklemindeki ek kütle ve ek atalet momenti aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} X_{Ha} &= X_{\dot{u}} \dot{u} - Y_{\dot{v}} v r = -m_x \dot{u} + m_y v r \\ Y_{Ha} &= Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{\dot{r}} \dot{r} + X_{\dot{u}} u r = -m_y \dot{v} + Y_{\dot{r}} \dot{r} - m_x u r \\ N_{Ha} &= N_{\dot{v}} \dot{v} + N_{\dot{r}} \dot{r} = N_{\dot{v}} \dot{v} - J_{zz} \dot{r} \end{aligned} \quad (65)$$

Hıza bağlı kuvvetler ve moment polinom formdadır. Boyuna kuvvet X_{Hv} , doğrusal hareketten kaynaklanan direnç kuvveti ve yanal ve savrulma hareketinden dolayı ek direnç kuvvetinden oluşmaktadır.

$$X_{Hv} = X(u) + X_{vv} v^2 + X_{vr} v r + X_{rr} r^2 \quad (66)$$

Yüksek ve normal hız manevrasında geminin ileri hız bileşeni yanal ve savrulma hareketinden dolayı oluşan yanal hız bileşenine göre büyüktür. Bundan dolayı lineer türevler baskındır. Ancak MMG modelinin geniş bir uygulama alanı bulması ve kaldırma ve çapraz akış fiziksel olayları göz önüne alındığında yanal tekne kuvveti ve savrulma momenti lineer ve lineer olmayan terimlere ayrılır.

$$\begin{aligned} Y_{Hv} &= Y_L + Y_{NL} = Y_v v + Y_r r + Y_{NL} \\ N_{Hv} &= N_L + N_{NL} = N_v v + N_r r + N_{NL} \end{aligned} \quad (67)$$

$$\begin{aligned}
Y_{NL} &= \int_{-1/2L}^{1/2L} C_D(x) |v + rx| (v + rx) dx \\
N_{NL} &= \int_{-1/2L}^{1/2L} C_D(x) |v + rx| (v + rx) dx
\end{aligned} \tag{68}$$

Çapraz akış itme katsayısı $C_D(x)$ sabit veya geminin x doğrultusunun bağılısı olarak polinom şeklinde modellenebilir.

Denklem 68'in fiziksel temeline rağmen genelde lineer olmayan terimler için ikinci ve üçüncü derece polinom seçilir.

$$\begin{aligned}
Y_{NL} &= Y_{vv} v^2 + Y_{vr} vr + Y_{rr} r^2 + Y_{vvv} v^3 + Y_{vrr} r^3 + (Y_{vvr} v + Y_{vrr} r) vr \\
N_{NL} &= N_{vv} v^2 + N_{vr} vr + N_{rr} r^2 + N_{vvv} v^3 + N_{vrr} r^3 + (N_{vvr} v + N_{vrr} r) vr
\end{aligned} \tag{69}$$

Üçüncü derece polinom ikinci derece polinoma tercih edilir.

$$\begin{aligned}
Y_{NL} &= Y_{vvv} v^3 + Y_{vrr} r^3 + (Y_{vvr} v + Y_{vrr} r) vr \\
N_{NL} &= N_{vvv} v^3 + N_{vrr} r^3 + (N_{vvr} v + N_{vrr} r) vr
\end{aligned} \tag{70}$$

Diğer bir yaklaşımda ise sadece ikinci terimler kullanılır:

$$\begin{aligned}
Y_{NL} &= Y_{|v|v} |v| v + Y_{|v|r} |v| r + Y_{|r|v} |r| v + Y_{|r|r} |r| r \\
N_{NL} &= N_{|v|v} |v| v + N_{|v|r} |v| r + N_{|r|v} |r| v + N_{|r|r} |r| r
\end{aligned} \tag{71}$$

1.5.3.2. Pervane Hidrodinamik Kuvvetleri ve Momenti

Pervanenin neden olduğu hidrodinamik kuvvet, açık-su karakteristiği K_T 'den yola çıkılarak hesap edilen pervanenin sağladığı itme kuvveti T_p , ve tekne ve pervane etkileşimi itme azalması t_p ile açıklanabilir. Sonuç olarak pervane hidrodinamik kuvveti aşağıdaki gibi yazılır:

$$X_p = (1 - t_p) T_p = (1 - t_p) \rho n^2 D_p^4 K_T(J) \quad (72)$$

- Pervane, tekne kıçında pozitif basınç değerlerini düşürerek tekne direncinin artmasına sebep olur. Bu nedenle pervanenin sağladığı itme kuvveti teknenin belirli hızına karşılık gelen direnç kuvvetinden bir miktar daha büyük olur. İtme azalması t_p , bütün gemi formları için yanal öteleme, savrulma ve pervane yüklemesine göre değişmesine rağmen genellikle sabit olarak alınır ve tipik olarak değeri 0.2'dir (The Research Committee of Dynamic Performance, 1985).

- Pervane açık-su karakteristiği K_T , ileri hareket-ileri itme operasyonu için ikinci derece polinom ile modellenenir.

$$K_T(J) = a_0 + a_1 J + a_2 J^2 \quad (73)$$

- Açık-su ilerleme katsayısı J_s , pervane dönme hızıyla ters orantılıdır. $J_s = u/nD_p$ eşitliğinden artan pervane yüküyle birlikte ilerleme katsayısı azalacaktır.

- İlerleme katsayısı J , tekne arkasındaki iz bölgesinden dolayı bir düzeltmeyi kapsamaktadır.

$$J = u(1 - w_p) / (nD_p) \quad (74)$$

- İz katsayısı w_p , geminin ileri hareket hızı ile pervane üzerine gelen akış hızı arasındaki ilişkiyi verir. Tipik olarak 0.1 değerini alan iz katsayısında pervane üzerine gelen akışın hızı geminin hızının %90'ı kadar olur. Pervane bu iz bölgesinde operasyonunu sürdürür. Doğrusal ileri hareketteki iz katsayısı w_{p0} , yanal öteleme ve savrulma hareketlerinden dolayı etkilenir. Temelde iki ifadeyle $1 - w_p$ değeri aşağıdaki gibi açıklanır.

$$\begin{aligned} 1 - w_p &= (1 - w_{p0}) + f(v', r') \\ 1 - w_p &= (1 - w_{p0}) \cdot f(v', r') \end{aligned} \quad (75)$$

Farklı yazarlara ait $1 - w_p$ iz katsayısı aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned}
 1 - w_p &= (1 - w_{p0}) + \tau \left\{ (v_p' + C_p v_p' | v_p' |)^2 + C_{pv} v' + C_{pr} r' \right\} \\
 1 - w_p &= (1 - w_{p0}) \left[1 + \tau \left\{ (v_p' + C_p v_p' | v_p' |)^2 + C_{pv} v' + C_{pr} r' \right\} \right] \\
 1 - w_p &= 1 - w_{p0} \cos(k_w v_p) + k_{w1} v_p \\
 1 - w_p &= 1 - w_{p0} \exp(-C v_p'^2) \\
 1 - w_p &= (1 - w_{p0}) + C_1 v' + C_2 r' + C_3 v'^2 + C_4 v' r' + C_5 r'^2
 \end{aligned} \tag{76}$$

Denklemlerde yer alan pervanedeki boyutsuz yatay hız bileşeni aşağıdaki gibidir:

$$v_p' = v' + x_p' r' \tag{77}$$

Denklemden yer alan x_p' , pervanenin koordinat sisteminin orijinine göre boyutsuz boyuna pozisyonunu belirtir. MMG çalışma grubuna göre iz katsayısı pervane yüklemesinden etkilenir ve etkisi doğrusal ileri hareketle sınırlandırılmıştır.

$$\begin{aligned}
 (1 - w_{p0}) &= b_0 + b_1 J_s \\
 (1 - w_{p0}) &= b_0' + b_1' J_s + b_2' J_s^2
 \end{aligned} \tag{78}$$

Son olarak geleneksel gemilerde pervane tarafından meydana gelen yanal itme ve dönme momenti sıfır olarak kabul edilir:

$$\begin{aligned}
 Y_p &= 0 \\
 N_p &= 0
 \end{aligned} \tag{79}$$

1.5.3.3. Dümen Hidrodinamik Kuvvetleri ve Momenti

Dümenin hareketiyle meydana gelen hidrodinamik kuvvetler ve moment aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{aligned}
X_R &= -(1-t_R)F_N \sin \delta \\
Y_R &= -(1+a_H)F_N \cos \delta \\
N_R &= -(x_R + a_H x_H)F_N \cos \delta
\end{aligned} \tag{80}$$

• Toplam dümen kuvveti F_R , dümen simetri düzlemine dik F_N ve paralel F_T kuvvetlerinden oluşmaktadır. Teğetsel kuvvet hesaplamalarda göz ardı edilir.

• $1-t_R$ dümene etkiyen boyuna kuvvet bileşeni ile kıyaslandığında direnç azalmasına karşılık gelen deneysel katsayıdır. Bu parametrenin gerçek değeri 0.7-0.8 arasında değişmektedir.

• Dümenin hareketi sonucunda yalnızca dümen üzerinde yanal kuvvet oluşmaz aynı zamanda tekne etrafında zorlanmış akıştan dolayı yanal tekne kuvveti yanal dümen kuvvetiyle orantılı olarak meydana gelir (a_H parametresi). x_H parametresi ise bu ek tekne kuvvetinin uygulandığı noktanın boyuna konumunu belirtir.

1.5.3.3.1. Dümen Normal Kuvveti

F_N dümen normal kuvveti aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$F_N = \frac{1}{2} \rho f_a A_R U_R^2 \sin \alpha_R \tag{81}$$

Bu denklemde yer alan A_R dümen alanını, f_a ise dümen kaldırma kuvveti katsayısının değişimini ifade etmekte olup Fujii formülüne göre dümen en-boy oranının fonksiyonu olarak aşağıdaki gibidir (Fujii & Tuda, 1961):

$$f_a = \frac{6.13\lambda}{\lambda + 2.25} \tag{82}$$

Tekne ve pervane arkasında üniform olmayan akış bölgesinde dümen için efektif akış hızı ve açısı aşağıdaki gibidir:

$$U_R = \sqrt{u_R^2 + v_R^2}$$

$$\alpha_R = \delta - \text{Arc tan} \left(\frac{-v_R}{u_R} \right) \quad (83)$$

1.5.3.3.2. Dümendeki Efektif Akış Hızının Boyuna Bileşeni

Dümen alanı iki farklı akış alanına ayrılır:

- Dümenin alt ve üst noktalarında akış hızı pervane tarafından ivmelenmez. Akışın tekne arkasındaki u_p akış hızıyla orantılı olduğu kabul edilir:

$$u_{R0} = \varepsilon u_p \quad (84)$$

Tekne, dümen ve pervanenin etkileşiminden dolayı doğrusal hareket için dümen iz katsayısı w_{R0} pervane iz katsayısı w_{p0} ' dan farklıdır. ε katsayısı aşağıdaki gibidir:

$$\varepsilon = \frac{1 - w_{R0}}{1 - w_{p0}} \quad (85)$$

- Dümen yüksekliği pervane çapı oranına ($\eta = H/D_p$) bağlı olarak dümene gelen akışın hızı pervane tarafından ivmelenebilir. Aktüatör disk momentum teorisine göre pervane kaynaklı dümene gelen akışın hızı aşağıdaki gibidir:

$$u_{RP} = u_{R0} + k_x u_p \left(\sqrt{1 + \frac{8K_T}{\pi J^2}} - 1 \right)$$

$$= \varepsilon u_p + k_x u_p \left(\sqrt{1 + \frac{8K_T}{\pi J^2}} - 1 \right)$$

$$= u_p \left[\varepsilon + k_x \left(\sqrt{1 + \frac{8K_T}{\pi J^2}} - 1 \right) \right] \quad (86)$$

k_x pervaneye göre dümenin eksenel pozisyonunu ifade etmektedir. Efektif dümen akış hızı u_R iki akış alanına bağlı olarak basitçe ağırlıklı ortalamayla ifade edilebilir:

$$u_R = \sqrt{\eta u_{RP}^2 + (1-\eta) u_{R0}^2} \quad (87)$$

Daha basit formda dümen akış hızı aşağıdaki gibidir.

$$u_R = \varepsilon u (1 - w_p) \sqrt{\eta \left\{ 1 + k \left(\sqrt{1 + \frac{8K_T}{\pi J^2}} - 1 \right) \right\}^2 + (1 - \eta)} \quad (88)$$

$$u_R = \varepsilon u_p \sqrt{1 + k \frac{8K_T}{\pi J^2}} \quad (89)$$

1.5.3.3.3. Dümendeki Efektif Akış Hızının Yanal Bileşeni

Tek pervaneli gemilerin dümeninde akış doğrusal harekette bile pervaneden dolayı asimetriyle karakterize edilir. Sonuç olarak dümen normal kuvveti F_N dümenin nötr konumunda sıfır değildir. Asimetrik akışa karşı koymak için gerekli olan δ_0 ofset dümen açısı yanal hız bileşeni oluşturur.

$$v_R = \delta_0 u_R = k_p s u_R \quad (90)$$

Yanal öteleme ve savrulmadan dolayı dümene gelen efektif akış hızının yanal bileşeni artış göstererek aşağıdaki gibi yazılır:

$$v_R = k_p s u_R + g(v', r') \quad (91)$$

Literatürde MMG modelinde kullanılan yanal hız bileşeni ve efektif akış açısı α_R için ifadeler aşağıdaki gibidir:

$$\bullet v_R' = v' + x_R' r' + C_R |v| v \quad (92)$$

Yanal hız bileşeni yanal öteleme ve savrulma hareketinden dolayı oluşan hız bileşenlerinden oluşmaktadır ve son terim tekne ve pervaneden dolayı aşağı akış etkisinin neden olduğu ifadedir.

$$\alpha_R = \delta - \alpha_0 = \delta - \text{Arc tan} \left(\frac{-v_R'}{u_R'} \right) = \delta - \gamma \left(\frac{-v_R'}{u_R'} \right) = \delta_R + \gamma \left(\frac{v_R'}{u_R'} \right) \quad (93)$$

γ akış-açı-düzeltilme veya akış-düzeltilme katsayısıdır ve C_R ile birlikte deneysel olarak tanımlanır. x_R' dümen normal kuvvetinin uygulama noktasının x doğrultusu boyunca konumunu belirtir.

$$\bullet v_R' = v' + x_R' r' \quad (94)$$

$$\alpha_R = -(\delta_R - \delta_0) - \gamma \left(\frac{-v_R'}{u_R'} \right) \quad (95)$$

x_R' yanal hız ile karşılaştırıldığında savrulma hızının etkisini içeren katsayıdır. Bu katsayı dümenin eksenel konumu ile uyumlu olması beklense de deneysel olarak belirlenen x_R' dümenin boyuna doğrultudaki konumunun iki katı kadar büyüklükte olabilir.

$$\bullet v_R' = u_R' \beta_R = u_R' (\beta - 2x_R' r') \quad (96)$$

$$\alpha_R = \delta_R (+\delta_0) - \gamma \beta_R \quad (97)$$

Burada ise x_R' yaklaşık olarak -0.5 değerindedir.

$$\bullet v_R = k_p s u_R + V g (v' + l_R' r') \quad (98)$$

l_R' deneysel katsayı dümenin boyuna konumunun iki katı kadar büyüklüğündedir (Elloot, 2006).

1.6. Deneysel Yöntemler ve Hidrodinamik Katsayıların Elde Edilmesi

Matematiksel modellerde yer alan hidrodinamik katsayıların elde edilebilmesi için geliştirilen yöntemlerden birisi deneysel verilere dayanan yaklaşımdır. Bu deneysel çalışmalar doğrusal çekme deneyi, dairesel hareketli mekanizma deneyleri ve düzlemsel hareket mekanizması deneylerinden oluşmaktadır. Deneyler yalnızca tekne, tekne dümen birleşimi veya tekne, dümen, pervane birleşimi ile gerçekleştirilmektedir.

Öncelikli olarak teknelerin orta noktasına göre üç serbestlik dereceli hareket için genel hareket denklemi daha öncesinde olduğu gibi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\begin{aligned} m(\ddot{u} - v r - x_G \dot{r}^2) &= X \\ m(\dot{v} + u r + x_G \dot{r}) &= Y \\ I_{zz} \dot{r} + m x_G (\dot{v} + u r) &= N \end{aligned} \quad (99)$$

Hareket denklemlerinin sağ tarafında yer alan kuvvet ve moment büyüklükleri farklı yaklaşımlarla ifade edilse de burada Abkowitz modeli kullanılmıştır. Abkowitz modelinde kuvvet ve moment büyüklüklerini aşağıdaki gibidir:

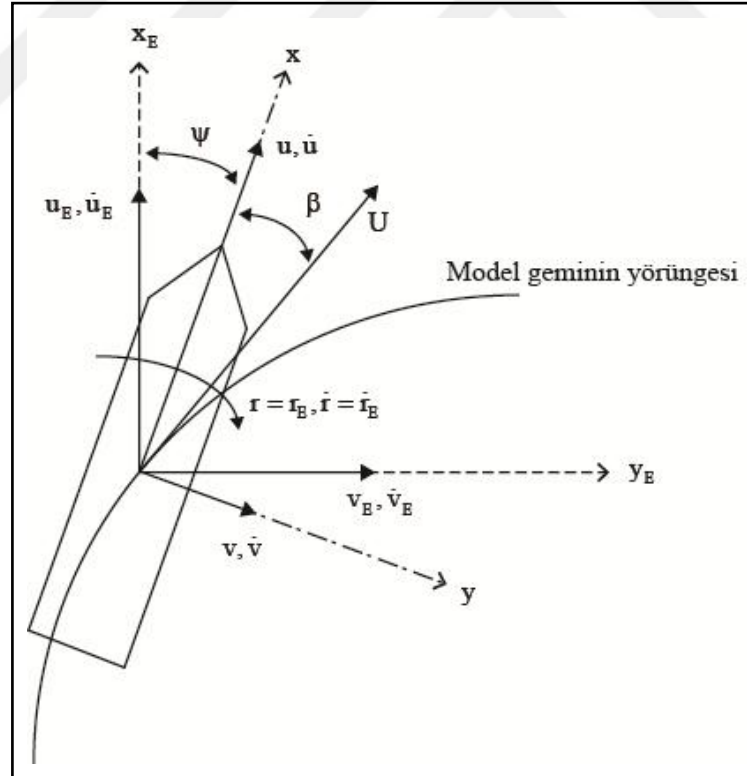
$$\begin{aligned} X &= X^0 + X_u \Delta U + X_{\dot{u}} \dot{u} + X_{uu} \Delta U^2 + X_{vv} v^2 + X_{rr} r^2 + X_{\delta\delta} \delta^2 + X_{vr} v r \\ &+ X_{v\delta} v \delta + X_{r\delta} r \delta + X_{uuu} \Delta U^3 + X_{uvv} \Delta U v^2 + X_{urr} \Delta U r^2 \\ &+ X_{u\delta\delta} \Delta U \delta^2 + X_{uvr} \Delta U v r + X_{uv\delta} \Delta U v \delta + X_{ur\delta} \Delta U r \delta \end{aligned} \quad (100)$$

$$\begin{aligned} Y &= Y^0 + Y_u^0 \Delta U + Y_{uu}^0 \Delta U^2 + Y_v v + Y_r r + Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{\dot{r}} \dot{r} + Y_{\delta} \delta + Y_{uv} \Delta U v \\ &+ Y_{ur} \Delta U r + Y_{u\delta} \Delta U \delta + Y_{vvv} v^3 + Y_{rrr} r^3 + Y_{\delta\delta\delta} \delta^3 + Y_{uuu} \Delta U^2 v \\ &+ Y_{uur} \Delta U^2 r + Y_{uu\delta} \Delta U^2 \delta + Y_{vvr} v^2 r + Y_{vv\delta} v^2 \delta + Y_{vrr} v r^2 \\ &+ Y_{v\delta\delta} v \delta^2 + Y_{r\delta\delta} r \delta^2 + Y_{rr\delta} r^2 \delta + Y_{vr\delta} v r \delta \end{aligned} \quad (101)$$

$$\begin{aligned}
N = & N^0 + N_u^0 \Delta U + N_{uu}^0 \Delta U^2 + N_v v + N_r r + N_{\dot{v}} \dot{v} + N_{\dot{r}} \dot{r} + N_{\delta} \delta + N_{uv} \Delta U v \\
& + N_{ur} \Delta U r + N_{u\delta} \Delta U \delta + N_{vvv} v^3 + N_{rrr} r^3 + N_{\delta\delta\delta} \delta^3 + N_{uuv} \Delta U^2 v \\
& + N_{uur} \Delta U^2 r + N_{uu\delta} \Delta U^2 \delta + N_{vvr} v^2 r + N_{vv\delta} v^2 \delta + N_{vrr} v r^2 \\
& + N_{v\delta\delta} v \delta^2 + N_{r\delta\delta} r \delta^2 + N_{rr\delta} r^2 \delta + N_{vr\delta} v r \delta
\end{aligned} \tag{102}$$

1.6.1. Hareketlerin Tanımlanması

Dünya merkezli ve gemi merkezli iki koordinat sistemi tanımlanmıştır. Şekil 6’da görüleceği üzere dünya merkezli koordinat sistemi x_E ve y_E koordinatları çekme tankının boyuna ve yanal yönlerinde hizalanacak şekilde sabitlenmiştir. Gemi merkezli koordinat sistemi ise modelin x ve y koordinatlarına denk getirilecek şekilde hareket etmektedir. Kolaylık için dünya merkezli koordinat sistemi gemi merkezli koordinat sistemiyle çakışacak şekilde gösterilmiştir.



Şekil 6. Koordinat sistemi ve hareket parametreleri (H. Yoon, 2009)

Modelin dünya merkezli koordinat sisteminin x_E ve y_E doğrultularındaki hızları u_E ve v_E ivmeleri ise $\dot{u}_E$ ve $\dot{v}_E$ gemi merkezli koordinat sisteminin x ve y doğrultusundaki hızları u ve v , ivmeleri ise $\dot{u}$ ve $\dot{v}$ 'dir. Sonuç olarak teknenin ilerleme hızı aşağıdaki gibi yazılır:

$$U = \sqrt{u_E^2 + v_E^2} = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (103)$$

Bu hız, her zaman gemi orta noktasının yörüngesine teğettir. Sürüklenme açısı β , U ilerleme hızına göre tanımlanmaktadır.

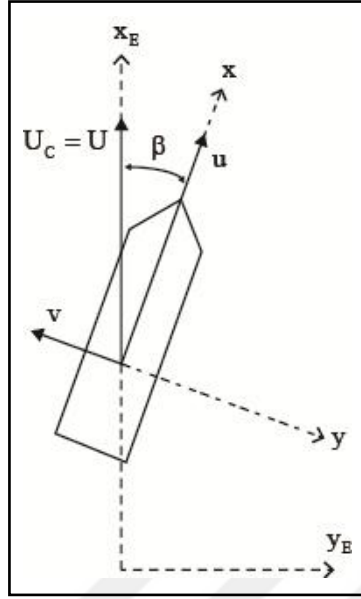
$$\beta = -\arctan(v/u) \quad (104)$$

Savrulma açısı ψ ise x_E doğrultusuna göre tanımlanmaktadır ve hem dünya merkezli hem de gemi merkezli eksen takımlarına savrulma hızları ve ivmeleri eş değerdedir ($r_E = r = \dot{\psi}$ ve $\dot{r}_E = \dot{r} = \ddot{\psi}$). Son olarak dünya merkezli eksen takımı ile gemi merkezli eksen takımları arasındaki hız ve ivme ifadeleri aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{aligned} u &= u_E \cos(\psi) + v_E \sin(\psi) \\ v &= -u_E \sin(\psi) + v_E \cos(\psi) \\ r &= r_E \\ \dot{u} &= \dot{u}_E \cos(\psi) + \dot{v}_E \sin(\psi) + r_E (-u_E \sin(\psi) + v_E \cos(\psi)) \\ \dot{v} &= -\dot{u}_E \sin(\psi) + \dot{v}_E \cos(\psi) - r_E (u_E \sin(\psi) + v_E \cos(\psi)) \\ \dot{r} &= \dot{r}_E \end{aligned} \quad (105)$$

1.6.2. Doğrusal Çekme Deneyi

Şekil 7'deki gibi model çekme tankı boyuna doğrultusunda sabit hızda farklı sürüklenme açısı ve dümen açısında çekilir. Sonuç olarak model ivmelenmez fakat tekne ve dümeni geçen akış hidrodinamik kuvvet oluşturur.



Şekil 7. Doğrusal çekme hareketi (H. Yoon, 2009)

Modelin dünya merkezli eksen takımında hız ve ivme bileşenleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} u_E &= U_c & \dot{u}_E &= 0 \\ v_E &= 0 & \dot{v}_E &= 0 \\ r_E &= 0 & \dot{r}_E &= 0 \end{aligned} \quad (106)$$

Gemi merkezli eksen takımında ise modelin hız ve ivme bileşenleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} u &= U_c \cos(\beta) & \dot{u} &= 0 \\ v &= -U_c \sin(\beta) & \dot{v} &= 0 \\ r &= 0 & \dot{r} &= 0 \end{aligned} \quad (107)$$

Doğrusal çekme deneyinde belirli bir sürüklenme açısında tekne tutulup dümen sıfır konumunda tutulursa atalet kuvvetleri ve dönen bir hareket olmasından dolayı kuvvet ve moment büyüklükleri aşağıdaki gibi yazılır:

$$X = X^0 + X_{vv} v^2 \quad (108)$$

$$Y = Y^0 + Y_v v + Y_{vvv} v^3 \quad (109)$$

$$N = N^0 + N_v v + N_{vv} v^3 \quad (110)$$

Eğer tekne belirli bir sürüklenme açında tutulmayıp dümen farklı açılarda tutularak deney gerçekleştirilirse kuvvet ve moment büyüklükleri aşağıdaki gibi olur:

$$X = X^0 + X_{\delta\delta} \delta^2 \quad (111)$$

$$Y = Y^0 + Y_{\delta} \delta + Y_{\delta\delta\delta} \delta^3 \quad (112)$$

$$N = N^0 + N_{\delta} \delta + N_{\delta\delta\delta} \delta^3 \quad (113)$$

Son olarak teknenin ve dümenin farklı açılarda tutulmasıyla gerçekleştirilen deneyde kuvvet ve moment büyüklükleri aşağıdaki gibi yazılır:

$$X = X^0 + X_{vv} v^2 + X_{\delta\delta} \delta^2 + X_{v\delta} v\delta \quad (114)$$

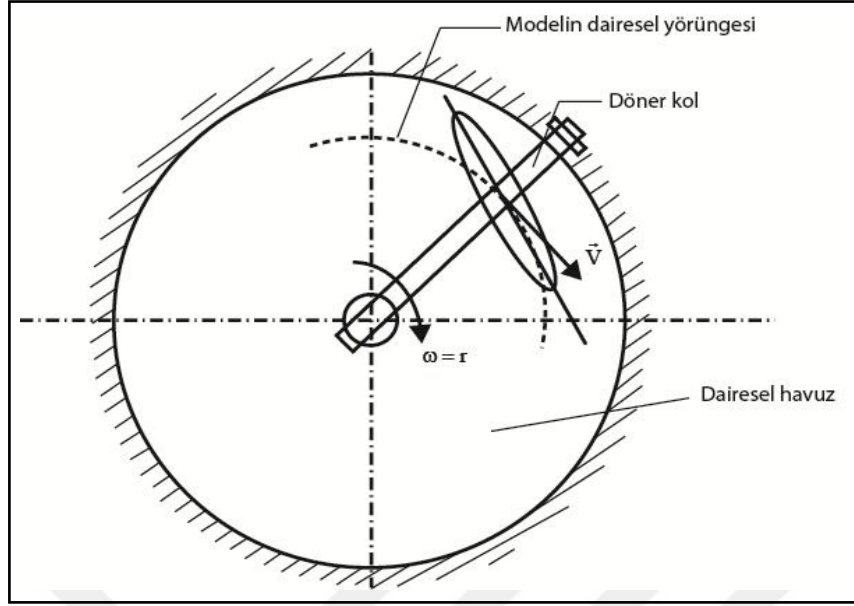
$$Y = Y^0 + Y_v v + Y_{\delta} \delta + Y_{vv} v^3 + Y_{\delta\delta\delta} \delta^3 + Y_{vv\delta} v^2\delta + Y_{v\delta\delta} v\delta^2 \quad (115)$$

$$N = N^0 + N_v v + N_{\delta} \delta + N_{vv} v^3 + N_{\delta\delta\delta} \delta^3 + N_{vv\delta} v^2\delta + N_{v\delta\delta} v\delta^2 \quad (116)$$

Buradaki hidrodinamik katsayılar deneysel verilere eğri (polinom) uydurulur ve uydurulan bu polinomun katsayıları hidrodinamik katsayılarla karşılık gelmektedir.

1.6.3. Dairesel Hareketli Mekanizma Deneyleri

Şekil 8’de görüleceği üzere hidrodinamik katsayıların belirlenmesi için tasarlanmış bir başka deney sistemi dairesel hareketli mekanizma (döner-kol tekniği) ile model düşey eksen etrafında dönebilen kola takılır ve genişliği fazla olan havuz içerisinde dairesel bir yörünge üzerinde döndürülür. Dinamometre yardımıyla ölçülen X, Y ve N gibi büyüklüklerinin r değişkeni ile olan ilişkisi belirlenerek hidrodinamik katsayılar tayin edilir.

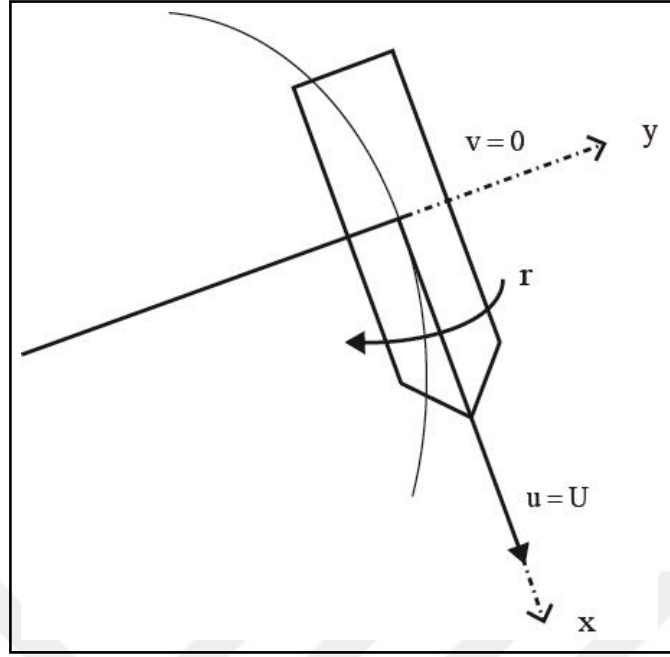


Şekil 8. Dairesel hareketli mekanizma deneyi (Zaojian, 2006)

Dairesel hareketli mekanizma deneylerinde kullanılan modellerin boyları büyük ise dönme yarıçapının aynı oranda büyümesi sonucu çok büyük çaplı dairesel havuz ve döner kolu olan laboratuvarın kullanılmasını gerektirir. Buna karşılık çok küçük modellerin kullanılmasında gerçek değerlere geçişte ölçek etkisi artacağından yapılan tahminin doğruluğu azalır (Sabuncu, 1985). Döner kol tekniğinde dümenin orta konumda tutulduğunu düşünürsek iki türde deney yapılır. Bunlardan birisi atak açısının sıfır olduğu ($\beta=0$) yalnızca savrulma deneyi, bir diğeri de atak açısının değiştirildiği ($\beta \neq 0$) yalnızca savrulma deneyidir.

1.6.3.1. Dairesel Hareketli Mekanizmada Yalnızca Savrulma Deneyi

Şekil 9'daki gibi model x ve z-ekseni kola dik olacak şekilde tercihen modelin orta noktasından bağlanır. Model sabit r açısal hızıyla dairesel bir yörünge üzerinde döndürülürken yanal hız bileşeni sıfır olur. Böylelikle bu deney sonucunda r 'ye bağlı olan hidrodinamik katsayılar hesap edilir.



Şekil 9. Dairesel hareketli mekanizma deneyinde yalnızca savrulma hareketi

Gemi merkezli eksen takımında ise modelin hız ve ivme bileşenleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned}
 u &= U_c & \dot{u} &= 0 \\
 v &= 0 & \dot{v} &= 0 \\
 r &= U_c / R & \dot{r} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{117}$$

Dümen açısının sıfır konumunda tutulduğu bu deneyde kuvvet ve moment büyüklükleri aşağıdaki gibi yazılır:

$$X = X^0 + X_{\pi} r^2 \tag{118}$$

$$Y = Y^0 + Y_r r + Y_{\pi\pi} r^3 \tag{119}$$

$$N = N^0 + N_r r + N_{\pi\pi} r^3 \tag{120}$$

Dümen açısının değiştirilerek gerçekleştirilen yalnızca savrulma deneyinde ise kuvvet ve moment büyüklükleri aşağıdaki gibi olur:

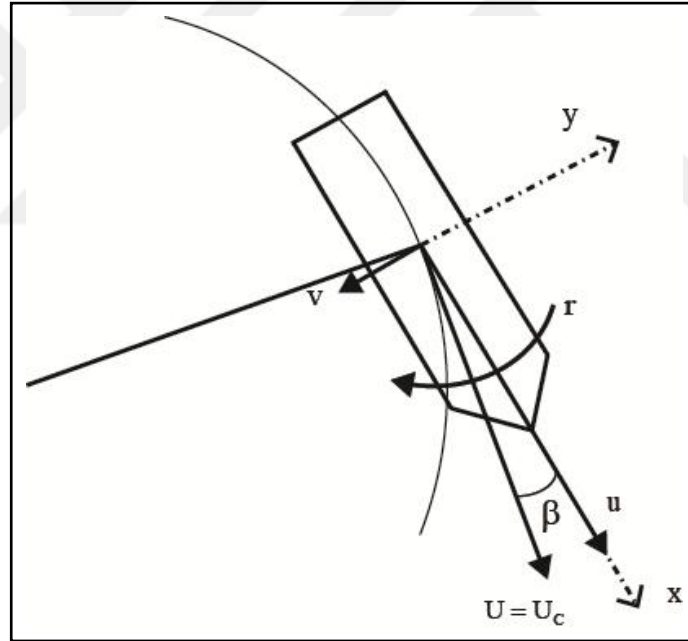
$$X = X^0 + X_{rr}r^2 + X_{\delta\delta}\delta^2 + X_{r\delta}r\delta \quad (121)$$

$$Y = Y^0 + Y_r r + Y_\delta \delta + Y_{rr}r^3 + Y_{\delta\delta\delta}\delta^3 + Y_{r\delta\delta}r\delta^2 + Y_{rr\delta}r^2\delta \quad (122)$$

$$N = N^0 + N_r r + N_\delta \delta^3 + N_{rr}r^3 + N_{\delta\delta\delta}\delta^3 + N_{r\delta\delta}r\delta^2 + N_{rr\delta}r^2\delta \quad (123)$$

1.6.3.2. Dairesel Hareketli Mekanizmada Belirli Bir Sürüklenme Açısıyla Savrulma Deneyi

Şekil 10'da görüldüğü gibi belirli bir sürüklenme açısında tutulan model dairesel bir yörünge üzerinde hareket ettirilerek gerçekleştirilen bu deney sayesinde v ve r 'ye bağlı hidrodinamik katsayılar hesap edilir.



Şekil 10. Dairesel hareketli mekanizma deneyinde belirli bir sürüklenme açısıyla savrulma hareketi

Gemi merkezli eksen takımında ise modelin hız ve ivme bileşenleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} u &= U_c \cos(\beta) & \dot{u} &= 0 \\ v &= -U_c \sin(\beta) & \dot{v} &= 0 \\ r &= U_c / R & \dot{r} &= 0 \end{aligned} \quad (124)$$

Sonuç olarak dümen açısının sıfır konumunda tutularak gerçekleştirilen deneyde kuvvet ve moment büyüklükleri aşağıdaki gibidir:

$$X = X^0 + X_{vv}v^2 + X_{rr}r^2 + X_{vr}vr \quad (125)$$

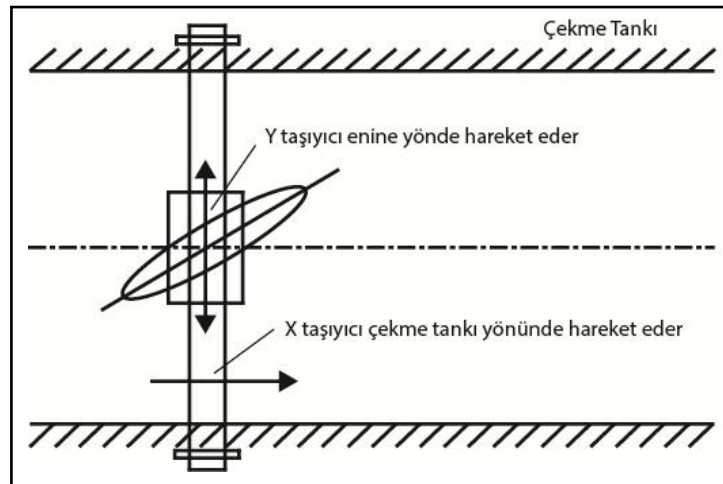
$$Y = Y^0 + Y_vv + Y_rr + Y_{vvv}v^3 + Y_{rrr}r^3 + Y_{vvr}v^2r + Y_{vrr}vr^2 \quad (126)$$

$$N = N^0 + N_vv + N_rr + N_{vvv}v^3 + N_{rrr}r^3 + N_{vvr}v^2r + N_{vrr}vr^2 \quad (127)$$

Ayrıca dümen açısının değiştirilerek gerçekleştirilen deneyde $Y_{vr\delta}$ ve $N_{vr\delta}$ terimlerini de hesaplayabilmek mümkündür.

1.6.4. Düzlemsel Hareketli Mekanizma Deneyleri

Düzlemsel hareketli mekanizma deneyi, kendinden tahrikli gemi modeline bir dizi basit gemi yörüngelerini zorlaması esasına dayanan deneysel yöntemdir. Ataletin var olduğu bu deneyde Şekil 11’de görüldüğü gibi model çekme tankının boyuna doğrultusunda aynı sabit hızla mekanizma tarafından hareket ettirilir ve enine harmonik hareket de bu olaya dahil edilmektedir. Her iki hareket global referans sistemine göre hesap edilir. Başlıca harmonik hareketler yalnızca yanal öteleme, yalnızca savrulma ve savrulma ve sürüklenmedir.



Şekil 11. Düzlemsel hareketli mekanizma deneyi (Zaojian, 2006)

En genel anlamda model, dünya eksenli koordinat sisteminde üç temel harekete zorlanır:

$$\begin{aligned} x_E &= U_c t \\ y_E &= -y_{\max} \sin(\omega t) \\ \psi &= -\arctan(\kappa \cos(\omega t)) + \beta \end{aligned} \quad (128)$$

Burada ω yanal genliği, κ ise modelin yörüngesinin maksimum eğimini belirtmektedir.

$$\kappa = \left(\frac{dy_E}{dx_E} \right)_{\max} = \left(\frac{dy_E / dt}{dx_E / dt} \right)_{\max} = \frac{y_{\max} \omega}{U_c} \quad (129)$$

1.6.4.1. Düzlemsel Hareketli Mekanizmada Yalnızca Yanal Öteleme Deneyi

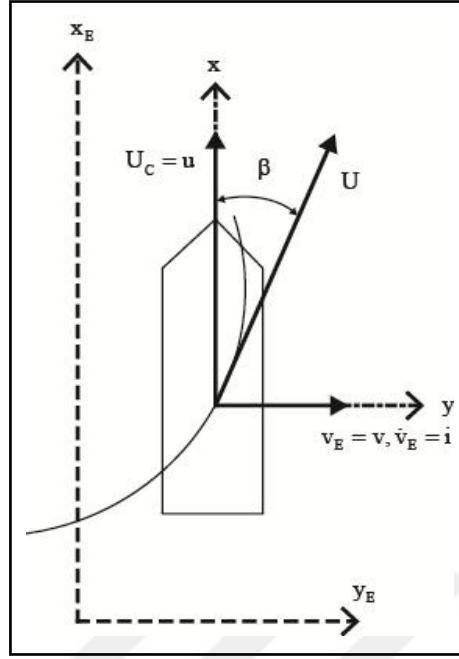
Şekil 12'deki gibi model çekme tankının boyuna doğrultusundaki U_c hızı ile aynı olacak şekilde hareket ettirilirken, mekanizma ayrıca harmonik yanal hareketi modele uygulatır. Bu deneyde model sürekli başlangıç boyuna doğrultuya paralel olacak şekilde tutulur ve dümen her zaman orta noktadadır.

Yalnızca yanal öteleme deneyinde $y_{\max}$ ve ω sıfırdan farklı iken ψ sıfıra eşittir. Fakat sürüklenme açısı β sürekli değişir ($\beta = \arctan(\kappa \cos(\omega t))$). Modelin dünya merkezli eksen takımında hız ve ivme bileşenleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} u_E &= U_c & \dot{u}_E &= 0 \\ v_E &= -y_{\max} \omega \cos(\omega t) & \dot{v}_E &= y_{\max} \omega^2 \sin(\omega t) \\ r_E &= 0 & \dot{r}_E &= 0 \end{aligned} \quad (130)$$

Gemi merkezli eksen takımında ise modelin hız ve ivme bileşenleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} u &= U_c & \dot{u} &= 0 \\ v &= -y_{\max} \omega \cos(\omega t) & \dot{v} &= y_{\max} \omega^2 \sin(\omega t) \\ r &= 0 & \dot{r} &= 0 \end{aligned} \quad (131)$$



Şekil 12. Düzlemsel hareketli mekanizma deneyinde yalnızca yanal öteleme hareketi (H. Yoon, 2009)

Harmonik hareketin çeşitli frekans ve genliklerinde, boyuna ve yanal kuvvet yerel koordinat ekseninde kayıt edilir. Hidrodinamik türevlerin tanımlanması için, ölçülen kuvvetler analitik ifadelerine eşitlenecektir. Teorik olarak ölçülen kuvvetler ve momentleri atalet ve hidrodinamik kısımlardan oluşmaktadır.

Hareket denkleminin sol tarafında yer alan kinematik parametrelerin kullanılmasıyla ölçülen kuvvetin atalet kısmı aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} X_i &= 0 \\ Y_i &= -m\dot{v} \\ N_i &= -mx_G\dot{v} \end{aligned} \tag{132}$$

Atalet kuvveti mekanizmanın oluşturduğu ivmelenmenin karşıt yönündedir. Hidrodinamik kısım ise Taylor açılımındaki yalnızca 1. terimlerin alınmasıyla ifade edilir. Bu lineer yaklaşımdır ve hidrodinamik kısım aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\begin{aligned}
X_{\text{hyd}} &= X^0 \\
Y_{\text{hyd}} &= Y^0 + Y_v v + Y_{\dot{v}} \dot{v} \\
N_{\text{hyd}} &= N^0 + N_v v + N_{\dot{v}} \dot{v}
\end{aligned} \tag{133}$$

$v_{\text{max}} = -y_{\text{max}} \omega$ ve $\dot{v}_{\text{max}} = y_{\text{max}} \omega^2$ kabulü yaparak, teorik olarak ölçülmüş kuvvet ve moment büyüklüklerini aşağıdaki gibi ifade edebiliriz:

$$\begin{aligned}
X_T &= X^0 \\
Y_T &= Y^0 + (Y_v v_{\text{max}}) \cos(\omega t) + [(Y_{\dot{v}} - m\dot{v}) \dot{v}_{\text{max}}] \sin(\omega t) \\
N_T &= N^0 + (N_v v_{\text{max}}) \cos(\omega t) + [(N_{\dot{v}} - m\dot{v}) \dot{v}_{\text{max}}] \sin(\omega t)
\end{aligned} \tag{134}$$

Deneysel kuvvet 1. derece trigonometrik Fourier serisi ile ifade edilebilir:

$$\begin{aligned}
X_E &= X^{0E} \\
Y_E &= Y^{0E} + Y_{1a} \cos(\omega t) + Y_{1b} \sin(\omega t) \\
N_E &= N^{0E} + N_{1a} \cos(\omega t) + N_{1b} \sin(\omega t)
\end{aligned} \tag{135}$$

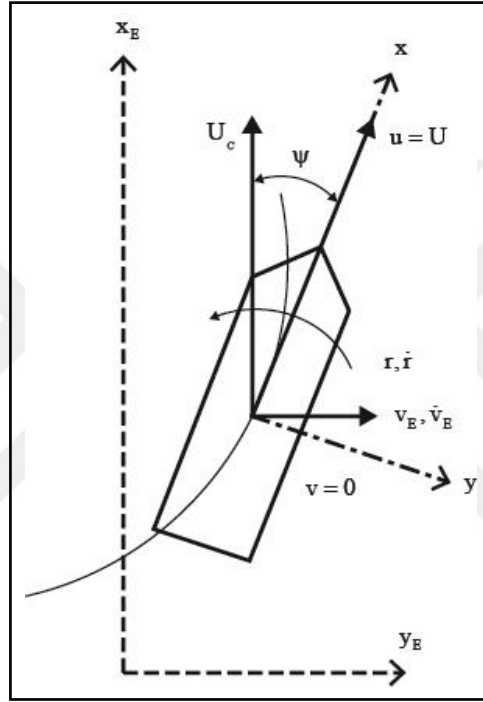
Sonuç olarak hidrodinamik katsayılar aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{aligned}
X^{0E} &= X^0 \\
Y^{0E} &= Y^0 & Y_{1a} &= Y_v v_{\text{max}} & Y_{1b} &= (Y_{\dot{v}} - m\dot{v}) \dot{v}_{\text{max}} \\
N^{0E} &= N^0 & N_{1a} &= N_v v_{\text{max}} & N_{1b} &= (N_{\dot{v}} - m\dot{x}_G) \dot{v}_{\text{max}}
\end{aligned} \tag{136}$$

Birkaç genlik ve frekansta hidrodinamik türevler hesaplanacağından dolayı son değer v_{max} ve $\dot{v}_{\text{max}}$ değişkenlerine bağlı Fourier serisi katsayılarında lineer regresyon uygulanarak hesap edilir. Genellikle, yalnızca $Y_{\dot{v}} - m\dot{v}$ ve $N_{\dot{v}} - m\dot{x}_G$ hidrodinamik türevleri elde edilir. Diğer terimler ataletin var olmadığı deneylerden elde edilir. Lineer olmayan yaklaşımda 3. dereceye kadar olan terimler hesap edilir. Fakat bu metotla hidrodinamik türevlerin hesap edilişi güvenilir değildir.

1.6.4.2. Düzlemsel Hareketli Mekanizmada Yalnızca Savrulma Deneyi

Model çekme tankının boyuna doğrultusunda U_c hızı ile aynı olacak şekilde sürüklenirken bir de mekanizma tarafından harmonik harekete zorlanır. Şekil 13'te görüleceği üzere yalnızca savrulma deneyinde mekanizma modeli sürekli yörüngeye teğet olacak şekilde tutmaya çalışır.



Şekil 13. Düzlemsel hareketli mekanizma deneyinde yalnızca savrulma hareketi (H. Yoon, 2009)

Yalnızca savrulma deneyinde $y_{\max}$ ve ω sıfırdan farklı iken β sıfıra eşittir. Fakat savrulma açısı ψ sürekli değişir. Modelin dünya merkezli eksen takımında hız ve ivme bileşenleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned}
 u_E &= U_c & \dot{u}_E &= 0 \\
 v_E &= -y_{\max} \omega \cos(\omega t) & \dot{v}_E &= y_{\max} \omega^2 \sin(\omega t) \\
 r_E &= \kappa \omega \sin(\omega t) \frac{1}{1 + \kappa^2 \cos^2(\omega t)} & \dot{r}_E &= \kappa \omega^2 \cos(\omega t) \frac{1 + \kappa^2 (1 + \sin^2(\omega t))}{(1 + \kappa^2 \cos^2(\omega t))^2}
 \end{aligned} \tag{137}$$

Gemi merkezli eksen takımında ise modelin hız ve ivme bileşenleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned}
 u &= U_c \sqrt{1 + \kappa^2 \cos^2(\omega t)} & \dot{u} &= -U_c \omega \frac{\kappa^2 \sin(2\omega t)}{2\sqrt{1 + \kappa^2 \cos^2(\omega t)}} \\
 v &= 0 & \dot{v} &= 0 \\
 r &= \kappa \omega \sin(\omega t) \frac{1}{1 + \kappa^2 \cos^2(\omega t)} & \dot{r} &= \kappa \omega^2 \cos(\omega t) \frac{1 + \kappa^2 (1 + \sin^2(\omega t))}{(1 + \kappa^2 \cos^2(\omega t))^2}
 \end{aligned} \tag{138}$$

Bu deneyde $\kappa \ll 1$ şartı yerine getirilirse modelin gemi merkezli eksen takımında yeni hız ve ivme bileşenleri aşağıdaki gibi olur:

$$\begin{aligned}
 u &\cong U_c & \dot{u} &\cong 0 \\
 v &= 0 & \dot{v} &= 0 \\
 r &\cong \kappa \omega \sin(\omega t) & \dot{r} &\cong \kappa \omega^2 \cos(\omega t)
 \end{aligned} \tag{139}$$

Hareket denkleminin sol tarafında yer alan ölçülen kuvvetin atalet kısmı aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned}
 X_i &= m x_G r^2 \\
 Y_i &= -m U_c r - m x_G \dot{r} \\
 N_i &= -I_{zz} \dot{r} - m U_c x_G r
 \end{aligned} \tag{140}$$

Lineer yaklaşımda yalnızca birinci derece terimler dikkate alınacağından kuvvet ve momentin hidrodinamik kısmı aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{aligned}
 X_{hyd} &= X^0 \\
 Y_{hyd} &= Y^0 + Y_r r + Y_{\dot{r}} \dot{r} \\
 N_{hyd} &= N^0 + N_r r + N_{\dot{r}} \dot{r}
 \end{aligned} \tag{141}$$

$r_{max} = \kappa \omega$, $\dot{r}_{max} = \kappa \omega^2$ ve X_i 'in ikinci derece kısmı göz ardı edildiği kabulü ile teorik olarak toplam kuvvet ve moment aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned}
X_T &= X^0 \\
Y_T &= Y^0 + \left[(Y_r - mU_c) r_{\max} \right] \sin(\omega t) + \left[(Y_i - mx_G) r_{\max} \right] \cos(\omega t) \\
N_T &= N^0 + \left[(N_r - mU_c x_G) r_{\max} \right] \sin(\omega t) + \left[(N_i - I_{zz}) \dot{r}_{\max} \right] \cos(\omega t)
\end{aligned} \tag{142}$$

Deneysel kuvveti 1. derece trigonometrik Fourier serisi ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\begin{aligned}
X_E &= X^{0E} \\
Y_E &= Y^{0E} + Y_{1a} \cos(\omega t) + Y_{1b} \sin(\omega t) \\
N_E &= N^{0E} + N_{1a} \cos(\omega t) + N_{1b} \sin(\omega t)
\end{aligned} \tag{143}$$

Sonuç olarak hidrodinamik katsayılar aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{aligned}
X^{0E} &= X^0 \\
Y^{0E} &= Y^0 & Y_{1b} &= (Y_r - mU_c) r_{\max} & Y_{1a} &= (Y_i - mx_G) \dot{r}_{\max} \\
N^{0E} &= N^0 & N_{1b} &= (N_r - mU_c x_G) r_{\max} & N_{1a} &= (N_i - I_{zz}) \dot{r}_{\max}
\end{aligned} \tag{144}$$

Lineer olmayan yaklaşımda, kuvvet ve moment büyüklükleri için 3. dereceye kadar olan terimler ele alınır ve hidrodinamik kuvvetler ve moment aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned}
X_{\text{hyd}} &= X^0 + X_{\text{rr}} r^2 \\
Y_{\text{hyd}} &= Y^0 + Y_i \dot{r} + Y_r r + Y_{\text{rrr}} r^3 \\
N_{\text{hyd}} &= N^0 + N_i \dot{r} + N_r r + N_{\text{rrr}} r^3
\end{aligned} \tag{145}$$

Sonuç olarak teorik toplam kuvvet ve moment aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned}
X_T &= X^0 + (mx_G + X_{rr})r_{\max}^2 \sin^2(\omega t) \\
Y_T &= Y^0 + [(Y_r - mx_G)r_{\max}] \cos(\omega t) + [(Y_r - mU_c)r_{\max}] \sin(\omega t) \\
&\quad + Y_{rr}r_{\max}^3 \sin^3(\omega t) \\
N_T &= N^0 + [(N_r - I_{zz})\dot{r}_{\max}] \cos(\omega t) + [(N_r - mU_c x_G)r_{\max}] \sin(\omega t) \\
&\quad + N_{rr}r_{\max}^3 \sin^3(\omega t)
\end{aligned} \tag{146}$$

Deneysel kuvveti trigonometrik Fourier serisi ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\begin{aligned}
X_E &= X^{0E} + X_{2a} \cos(2\omega t) \\
Y_E &= Y^{0E} + Y_{1a} \cos(\omega t) + Y_{1b} \sin(\omega t) + Y_{3b} \sin(3\omega t) \\
N_E &= N^{0E} + N_{1a} \cos(\omega t) + N_{1b} \sin(\omega t) + N_{3b} \sin(3\omega t)
\end{aligned} \tag{147}$$

Sonuç olarak trigonometrik fonksiyonların yardımıyla hidrodinamik katsayılar aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{aligned}
X^{0E} &= X^0 + (mx_G + X_{rr})r_{\max}^2 & X_{2a} &= -\frac{1}{2}(mx_G + X_{rr})r_{\max}^2 \\
Y^{0E} &= Y^0 & Y_{1a} &= (Y_r - mx_G)\dot{r}_{\max} \\
Y_{1b} &= (Y_r - mU_c)r_{\max} + \frac{3}{4}Y_{rr}r_{\max}^3 & Y_{3b} &= -\frac{1}{4}Y_{rr}r_{\max}^3 \\
N^{0E} &= N^0 & N_{1a} &= (N_r - I_{zz})\dot{r}_{\max} \\
N_{1b} &= (N_r - mU_c x_G)r_{\max} + \frac{3}{4}N_{rr}r_{\max}^3 & N_{3b} &= -\frac{1}{4}N_{rr}r_{\max}^3
\end{aligned} \tag{148}$$

1.6.4.3. Düzlemsel Hareketli Mekanizmada Savrulma ve Sürüklenme Deneyi

Şekil 14'te görüleceği üzere bu deney yalnızca savrulma deneyi ile aynıdır fakat modelin boyuna eksenini sabit bir β açısına sahiptir.

Bu deneyde de $\kappa \ll 1$ şartı yerine getirilirse modelin gemi merkezli eksen takımında yeni hız ve ivme bileşenleri aşağıdaki gibi olur:

$$\begin{aligned} u &\cong U_c \cos \beta & \dot{u} &\cong 0 \\ v &\cong -U_c \sin \beta & \dot{v} &\cong 0 \\ r &\cong \kappa \omega \sin(\omega t) & \dot{r} &\cong \kappa \omega^2 \cos(\omega t) \end{aligned} \quad (151)$$

Hareket denkleminin sol tarafında yer alan ölçülen kuvvetin atalet kısmı aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} X_i &= mvr + mx_G r^2 \\ Y_i &= -mur - mx_G \dot{r} \\ N_i &= -I_{zz} \dot{r} - mux_G r \end{aligned} \quad (152)$$

Hidrodinamik kuvvet ve moment büyüklükleri teorik olarak aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{aligned} X_{hyd} &= X^0 + X_{vv} v^2 + X_{rr} r^2 + X_{vr} vr \\ Y_{hyd} &= Y^0 + Y_{\dot{r}} \dot{r} + Y_v v + Y_{vvv} v^3 + Y_r r + Y_{rrr} r^3 + Y_{vvr} v^2 r + Y_{vrr} vr^2 \\ N_{hyd} &= N^0 + N_{\dot{r}} \dot{r} + N_v v + N_{vvv} v^3 + N_r r + N_{rrr} r^3 + N_{vvr} v^2 r + N_{vrr} vr^2 \end{aligned} \quad (153)$$

Sonuç olarak teorik toplam kuvvet ve moment aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} X_T &= X^0 + X_{vv} v^2 + (mx_G + X_{rr}) r_{\max}^2 \sin^2(\omega t) + (m + X_{vr}) vr_{\max} \sin(\omega t) \\ Y_T &= Y^0 + (Y_{\dot{r}} - mx_G) \dot{r}_{\max} \cos(\omega t) + Y_v v + Y_{vvv} v^3 \\ &\quad + (Y_r - mu + Y_{vvr} v^2) r_{\max} \sin(\omega t) + Y_{rrr} r_{\max}^3 \sin^3(\omega t) + Y_{vrr} vr_{\max}^2 \sin^2(\omega t) \\ N_T &= N^0 + (N_{\dot{r}} - I_{zz}) \dot{r}_{\max} \cos(\omega t) + N_v v + N_{vvv} v^3 \\ &\quad + (N_r - mux_G + N_{vvr} v^2) r_{\max} \sin(\omega t) + N_{rrr} r_{\max}^3 \sin^3(\omega t) + N_{vrr} vr_{\max}^2 \sin^2(\omega t) \end{aligned} \quad (154)$$

Deneysel kuvveti trigonometrik Fourier serisi ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\begin{aligned}
X_E &= X^{0E} + X_{1b} \sin(\omega t) + X_{2a} \cos(2\omega t) \\
Y_E &= Y^{0E} + Y_{1a} \cos(\omega t) + Y_{1b} \sin(\omega t) + Y_{2a} \cos(2\omega t) + Y_{3b} \sin(3\omega t) \\
N_E &= N^{0E} + N_{1a} \cos(\omega t) + N_{1b} \sin(\omega t) + N_{2a} \cos(2\omega t) + N_{3b} \sin(3\omega t)
\end{aligned} \tag{155}$$

Sonuç olarak trigonometrik fonksiyonların yardımıyla hidrodinamik katsayılar aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{aligned}
X_{1b} &= (m + X_{vr}) v r_{\max} & X_{2a} &= -\frac{1}{2} (m x_G + X_{rr}) r_{\max}^2 \\
X^{0E} &= X^0 + X_{vv} v^2 + \frac{1}{2} (m x_G + X_{rr}) r_{\max}^2 \\
Y^{0E} &= Y^0 + Y_v v + Y_{vv} v^3 + \frac{1}{2} Y_{vrr} v r_{\max}^2 & Y_{1a} &= (Y_i - m x_G) \dot{r}_{\max} \\
Y_{1b} &= (Y_r - m u + Y_{vrr} v^2) r_{\max} + \frac{3}{4} Y_{rrr} r_{\max}^3 & Y_{2a} &= -\frac{1}{2} Y_{vrr} v r_{\max}^2 \\
Y_{3b} &= -\frac{1}{4} Y_{rrr} r_{\max}^3 \\
N^{0E} &= N^0 + N_v v + N_{vv} v^3 + \frac{1}{2} N_{vrr} v r_{\max}^2 & N_{1a} &= (N_r - I_{zz}) \dot{r}_{\max} \\
N_{1b} &= (N_r - m x_G + N_{vrr} v^2) r_{\max} + \frac{3}{4} N_{rrr} r_{\max}^3 & N_{2a} &= -\frac{1}{2} N_{vrr} v r_{\max}^2 \\
N_{3b} &= -\frac{1}{4} N_{rrr} r_{\max}^3
\end{aligned} \tag{156}$$

1.6.5. Hız Değişim Deneyleri

X_u, X_{uu}, X_{uuu} terimleri doğrusal çekme deneyinde $\beta = 0$ şartıyla farklı hızlarda tekrarlanmasıyla elde edilir. X^0 terimi sürüklenme açısının olmadığı doğrusal çekme deneyinde servis hızına karşılık gelen değeri temsil etmektedir. Eğer çekme tankının hızı değiştirilirse X^0 terimi aşağıdaki gibi artacak veya azalacaktır:

$$X^0(U + \Delta u) = X^0(U) + \Delta X \tag{157}$$

ΔX direncindeki değişim Taylor serisi kullanılarak aşağıdaki gibi yazılır:

$$\Delta X = \frac{\partial X}{\partial u} \Delta u + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 X}{\partial u^2} \Delta u^2 + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 X}{\partial u^3} \Delta u^3 + \dots \quad (158)$$

Eğer modelin hızı değiştirilirse ölçülen X değerleri $\Delta u = u - U$ 'nun polinom fonksiyonu olarak ifade edilir:

$$f(u) = c_0 + c_1 \Delta u + c_2 \Delta u^2 + c_3 \Delta u^3 + \dots \quad (159)$$

Sonuç olarak direnç ilgili hidrodinamik katsayılar aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$X_u = \frac{\partial f}{\partial u} = c_1 \quad X_{uu} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial u^2} = c_2 \quad X_{uuu} = \frac{1}{6} \frac{\partial^3 f}{\partial u^3} = c_3 \quad (160)$$

Benzer şekilde $X_v, Y_v, N_v, Y_r, N_r, Y_\delta, N_\delta$ gibi terimlerin de hızla olan ilişkisi uydurulacak olan polinomun katsayılarına karşılık gelmektedir (Bogdan, 2010; H. Yoon, 2009).

1.7. Sistem Tanımlama

Mevcut sistemin gerekli yönlerinin basitleştirilmiş sunumu olan modelleme fiziksel bir olayın araştırılmasını hedeflemekte ve sebep-sonuç ilişkilerini daha iyi anlamayı ve ortaya çıkarmayı sağlamaktadır. Verilerden modelin oluşturulması üç temel unsur üzerine kurulmaktadır. Bunlar:

- Veri seti
- Olası modellerin oluşturulması
- Veriler kullanılarak olası modellerin değerlendirilmesi için bir kural

Birinci kısımda girdi ve çıktı verileri özel tasarlanmış deneysel çalışmalarda kayıt altına alınır. Bu çalışmalarda deneysel çalışmayı yapan kişi ölçeceği sinyallerin zaman aralıklarını belirleyebilir. Burada amaç maksimum bilgiyi verecek olan verilerin oluşmasını sağlamaktır. İkinci kısımda olası modeller belirlenir ve içlerinden uygun olanı aranır. Bu kısım kuşku duyulacaklar arasında en önemlisi olmamakla birlikte aynı zamanda sistem tanımlama prosedürünün en zoru olarak karşımıza çıkmaktadır. Ön bilgi ve mühendislik bakışı modelin biçimsel özelliği ile birleştirilmelidir. Bazı zamanlarda modelin biçimi iyi bir modellemeden sonra elde edilir. Sonrasında modeldeki bilinmeyen fiziksel parametreler fiziksel kurallar ve iyi bilinen ilişkilerden çıkartılır. Standart lineer modellerde fiziksel temellere dayanmaksızın yalnızca verilere uydurulmasıyla bir sonuç alındığı bu modeller kara kutu (black box), fiziksel temellere dayanarak uyarlanabilir parametreler oluşturulan modeller ise gri kutu (grey box) olarak isimlendirilir. Son olarak üçüncü kısımda ise verilerin rehberliğinde en iyiyi bulma yani tanımlama metodu olarak karşımıza çıkmaktadır. Burada modelin kalitesinin değerlendirilmesi yeniden oluşturacağı verilere uyumluluğu ile yapılır.

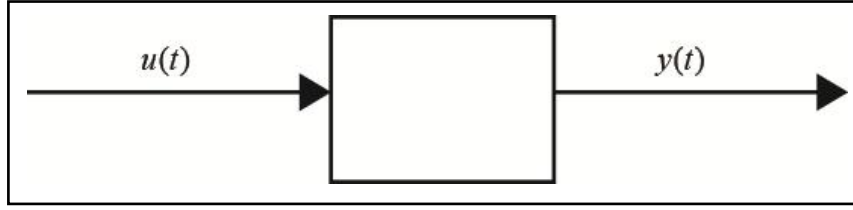
1.7.1. Zamandan Bağımsız Lineer Sistemler

Lineer sistemler şüphesiz pratikte ve literatürde dinamik sistemlerin en önemli sınıfını oluşturmaktadır. Bu sistemler gerçek hayatta karşılaşılan işlemlerin ideal durumlarını temsil etmektedir. Fakat böyle olmasına rağmen yaklaşımlar genellikle doğru ve çoğu durumda lineer teoriye dayalı tasarım değerlendirmeleri iyi sonuç vermektedir.

Öncelikli olarak lineer sistem teorisinin temelini oluşturan kavramlardan darbe cevabı, düzensizlik ve transfer fonksiyonu izah edilecektir.

1.7.1.1. Darbe cevabı

Şekil 15'te görüleceği üzere girdi sinyali $u(t)$ ve çıktı sinyali $y(t)$ olan bir sistem mevcuttur. Eğer girdi sinyallerine karşı sistemin tepkisi zamana bağlı değilse sistem zamandan bağımsızdır. Eğer girdilerin lineer kombinasyonuna karşılık sistemin çıktısı girdilerin ayrı ayrı tepkisine karşılık çıktının lineer kombinasyonu ile aynı ise sistem lineerdir.



Şekil 15. Sistem (Ljung, 1999)

Lineer, zamandan bağımsız bir sistem sistemin $g(\tau)$ darbe cevabı tarafından aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$y(t) = \int_{\tau=0}^{\infty} g(\tau) u(t-\tau) d\tau \quad (161)$$

$\{g(\tau)\}_{\tau=0}^{\infty}$ ve $s \leq t$ için $u(s)$ 'nin bilinmesiyle herhangi bir $s \leq t$ için karşılık gelen $y(s)$ hesaplanabilir.

1.7.1.2. Örnekleme

Ayrık zamanda girdiler ve çıktılar ele alındığında örnekleme anında ($t_k = kT$ $k=1,2,\dots$) gözlemlenenin $y(t)$ olduğu varsayılır:

$$y(kT) = \int_{\tau=0}^{\infty} g(\tau) u(kT-\tau) d\tau \quad (162)$$

Zaman aralığı T örnekleme zaman aralığı olarak adlandırılır. Çoğu kez bilgisayar uygulamalarında örnekleme anları arasında girdi sinyali $u(t)$ sabit kalır.

$$u(t) = u_k \quad kT \leq t < (k+1)T \quad (163)$$

Pratik uygulama nedeniyle yapılan bu gösterim fazlasıyla sistemin analizini basitleştirecektir. denklem 163'ün denklem 162'de yazılmasıyla

$$\begin{aligned}
 y(kT) &= \int_{\tau=0}^{\infty} g(\tau)u(kT-\tau)d\tau = \sum_{\ell=1}^{\infty} \int_{\tau=(\ell-1)T}^{iT} g(\tau)u(kT-\tau)d\tau \\
 &= \sum_{\ell=1}^{\infty} \left[\int_{\tau=(\ell-1)T}^{iT} g(\tau)d\tau \right] u_{k-\ell} = \sum_{\ell=1}^{\infty} g_T(\ell)u_{k-\ell}
 \end{aligned} \tag{164}$$

elde edilir. Burada

$$g_T(\ell) = \int_{\tau=(\ell-1)T}^{iT} g(\tau)d\tau \tag{165}$$

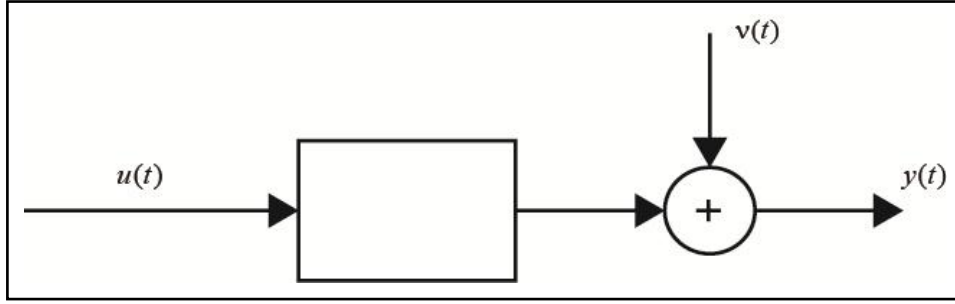
şeklindedir. Çoğu zaman örnekleme anlarını tek tek saymak için t notasyonu kullanılacağından denklem 164 aşağıdaki gibi yazılır:

$$y(t) = \sum_{k=1}^{\infty} g(k)u(t-k) \tag{166}$$

1.7.1.3. Düzensizlik

Denklem 166'ya göre girdi bilindiğinde çıktı hesap edilebilir. Pek çok durumda gerçek dışıdır. Sistemi etkileyen kontrol dışı sinyaller de mevcuttur. Lineer yapı içerisinde bunun gibi etkiler Şekil 16'da görüleceği üzere ek bir terim $v(t)$ içerisinde bir araya getirilerek çıktı aşağıdaki gibi oluşturulur.

$$y(t) = \sum_{k=1}^{\infty} g(k)u(t-k) + v(t) \tag{167}$$



Şekil 16. Düzensizlik eklentili sistem (Ljung, 1999)

1.7.1.4. Transfer Fonksiyonu

Öncelikli olarak ileri ve geri değişim operatörü aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\begin{aligned} qu(t) &= u(t+1) \\ q^{-1}u(t) &= u(t-1) \end{aligned} \quad (168)$$

Denklem 166 bu operatörler yardımıyla aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{aligned} y(t) &= \sum_{k=1}^{\infty} g(k)u(t-k) = \sum_{k=1}^{\infty} g(k)(q^{-1}u(t)) \\ &= \left[\sum_{k=1}^{\infty} g(k)q^{-k} \right] u(t) = G(q)u(t) \end{aligned} \quad (169)$$

Burada $G(q)$ lineer sistemin transfer operatörü veya transfer fonksiyonu olarak isimlendirilir ve aşağıdaki gibidir:

$$G(q) = \sum_{k=1}^{\infty} g(k)q^{-k} \quad (170)$$

Benzer şekilde düzensizlik terimi de aşağıdaki gibi yazılır:

$$H(q) = \sum_{k=0}^{\infty} h(k)q^{-k}$$

$$v(t) = H(q)e(t) \quad (171)$$

Sonuç olarak lineer sistemin düzensizlik eklentili temel ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$y(t) = G(q)u(t) + H(q)e(t) \quad (172)$$

1.7.2. Zamandan Bağımsız Lineer Sistem Modelleri

1.7.2. 1. Lineer Modeller ve Lineer Model Takımları

Zamandan bağımsız lineer modeller darbe cevabı $\{g(k)\}_1^\infty$, ek düzensizliğin spektrumu $\phi_w(\omega) = \lambda |H(e^{i\omega})|^2$ ve düzensizlik $e(t)$ 'nin olasılık yoğunluk fonksiyonu (OYF) ile tanımlanır. Sonuç olarak bütün bir model aşağıdaki gibidir:

$$y(t) = G(q)u(t) + H(q)e(t) \quad (173)$$

f_e, e 'nin OYF

$$G(q) = \sum_{k=1}^{\infty} g(k)q^{-k} \quad H(q) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} h(k)q^{-k}$$

Nitekim özel bir model üç fonksiyon G, H ve f_e 'nin belirlenmesiyle ifade edilir. Çoğu kez f_e fonksiyonu ile birlikte $\{g(k)\}, \{h(k)\}$ sonsuz dizilerin sıralamasıyla yapılan bu tanımlama pratik değildir. Bunun yerine sonlu sayıda nümerik değerler bakımından G ve H 'nin belirlenmesine müsaade edilen bir yapıyla çalışılması tercih edilir. Rasyonel transfer fonksiyonları ve sonlu boyutta durum-uzay tanımlamaları tipik örneğidir. Ayrıca çoğu kez f_e fonksiyon olarak tanımlanamaz fakat nümerik karakteristikleri açısından tanımlanır ve tipik olarak birinci ve ikinci momentleri aşağıdaki gibidir:

$$Ee(t) = \int x f_e(x) dx = 0$$

$$Ee^2(t) = \int x^2 f_e(x) dx = \lambda \quad (174)$$

$e(t)$ 'nin Gaussian olduğu varsayılmaktadır ve olasılık yoğunluk fonksiyonu tamamıyla denklem 174 ile belirlenir. Nümerik değerler veya katsayılar açısından denklem 173'ün belirlenmesi sistem tanımlama için önemli bir neticedir. Çoğu zaman sistemin davranışını yöneten fiziksel mekanizmaların bilgileriyle bu katsayıların belirlenmesi mümkün değildir. Bunun yerine tamamı veya bazılarının tanımlanması tahmin prosedürü ile gerçekleştirilir. Bu, denklem 173'teki katsayıların tanımlanacak olan katsayılar ile yazılması manasına gelmektedir. Genellikle parametreler θ vektörü ile gösterilir ve model aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$y(t) = G(q, \theta)u(t) + H(q, \theta)e(t)$$

$$f_e(x, \theta), e\text{'nin OYF}; \{e(t)\} \text{ beyaz gürültü} \quad (175)$$

Parametre vektörü θ , R^d 'nin alt kümesinde yer almaktadır ve d θ 'nin büyüklüğüdür.

$$\theta \in D_M \subset R^d \quad (176)$$

Denklem 175 ve denklem 176 birlikte bir model takımını temsil etmektedir ve bu takım en uygun parametreyi seçiminde tahmin prosedürü için gereklidir. Denklem 175 için tek-adım-ileri tahmin edici kullanıldığında θ 'ya bağlı tahmin edilen çıktı ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$\hat{y}(t|\theta) = H^{-1}(q, \theta)G(q, \theta)u(t) + [1 - H^{-1}(q, \theta)]y(t) \quad (177)$$

Denklem 177'deki gibi parametrize edilmiş model takımı model yapısı olarak isimlendirilir ve M ile gösterilir. Parametre θ ile ilişkilendirilmiş özel bir model ise $M(\theta)$ ile gösterilir.

1.7.2.2. Durum-Uzay Modelleri

Girdi, gürültü ve çıktı sinyalleri arasındaki ilişkiyi ifade eden durum-uzay formu durum vektörü $x(t)$ kullanılarak birinci mertebe diferansiyel veya fark denklemleri olarak yazılır. Sistemin fiziksel manası açısından durum-uzay modelleri formunda yazım oldukça kullanışlı ve kolaydır.

1.7.2.2.1. Fiziksel Temele Dayanan Sürekli-Zaman Modelleri

Pek çok fiziksel sistemler için fiziksel açıdan modelin oluşturulması ayırık zamana göre sürekli zamanda daha kolaydır. Çünkü pek çok fiziksel kural (Newton'un hareket kanunu, elektrik devresi kanunu, vb.) sürekli zamanda ifade edilir

$$\dot{x}(t) = F(\theta)x(t) + G(\theta)u(t) \quad (178)$$

Burada F ve G uygun boyutlardaki matrislerdir (n -boyutlu durum ve m -boyutlu girdi için $n \times n$ ve $n \times m$ matrisleri). Üst noktalı terim zamana göre olan türevi göstermektedir. Ayrıca θ parametre vektörü fiziksel katsayılar, malzeme sabiti ve bunun gibi bilinmeyen değerlere karşılık gelmektedir. Modelleme fiziksel büyüklükleri (pozisyon, hız, vb.) olan durum değişkenleri x açısından ele alınır ve ölçülen çıktılar durumların kombinasyonu ile bilinecektir. $\eta(t)$ ideal, gürültüsüz algılayıcılar ile elde edilen ölçümlerdir.

$$\eta(t) = Hx(t) \quad (179)$$

Türev operatörü için p 'nin kullanılmasıyla denklem 178 aşağıdaki gibi yazılır:

$$[pI - F(\theta)]x(t) = G(\theta)u(t) \quad (180)$$

Denklem 179' da u 'dan η 'ye transfer operatörü

$$\eta(t) = G_c(p, \theta)u(t)$$

$$G_C(p, \theta) = H[pI - F(\theta)]^{-1} G(\theta) \quad (181)$$

şeklindedir. Sonuç olarak sistemin sürekli-zaman transfer fonksiyonu elde edilir ve fiziksel katsayılar açısından parametrize edilir.

Gerçekte $\eta(t)$ 'nin gürültülü şeklinde ölçümlerin düzensizliği söz konusudur. Bu gürültü ve düzensizliğin tanımlanması için birkaç farklı çözüm vardır. Ölçümler $t = kT$, $k = 1, 2, \dots$ 'de örneklendiğinde düzensizlik etkisi $v_T(kT)$ olur. Sonuç olarak ölçülen çıktı aşağıdaki gibi olur:

$$y(kT) = Hx(kT) + v_T(kT) = G_C(p, \theta)u(t) + v_T(kT) \quad (182)$$

1.7.2.2.2. Transfer Fonksiyonu Örnekleme

$G_C(p, \theta)$ 'nin tanımlanması için pek çok yol mevcuttur. Girdilerin T zaman aralığı örnekleme sabit olduğunu varsayabiliriz.

$$u(t) = u_k = u(kT) \quad kT \leq t < (k+1)T \quad (183)$$

Denklem 178'deki diferansiyel denklem $t = kT$ 'den $t = kT + T$ 'ye kadar kolayca çözülebilir ve aşağıdaki gibidir:

$$x(kT + T) = A_T(\theta)x(kT) + B_T(\theta)u(kT) \quad (184)$$

Burada

$$A_T(\theta) = e^{F(\theta)T}$$

$$B_T(\theta) = \int_{\tau=0}^T e^{F(\theta)\tau} G(\theta) d\tau \quad (185)$$

şeklindedir. İleri değişim operatörü q 'nın kullanılmasıyla denklem 184 aşağıdaki gibi yazılır:

$$[qI - A_T(\theta)]x(kT) = B_T(\theta)u(kT) \quad (186)$$

veya

$$\begin{aligned} \eta(kT) &= G_T(q, \theta)u(kT) \\ G_T(q, \theta) &= H[qI - A_T(\theta)]^{-1} B_T(\theta) \end{aligned} \quad (187)$$

Sonuç olarak denklem 182 örnek-veri formunda aşağıdaki gibi olur:

$$y(t) = G_T(q, \theta)u(t) + v_T(t) \quad t = T, 2T, 3T, \dots \quad (188)$$

1.7.3. Zamanla Değişen ve Lineer Olmayan Sistemler İçin Modeller

1.7.3.1. Lineer, Zamanla Değişen Modeller

1.7.3.1.1. Ağırlık Fonksiyonu

Daha önce de belirtildiği üzere lineer sistemlerde girdilerin lineer kombinasyonu karşılık gelen çıktıların aynı lineer kombinasyonuna sebebiyet vermektedir. Genel lineer sistem aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$y(t) = \sum_{k=1}^{\infty} g_t(k)u(t-k) + v(t) \quad (189)$$

Eğer $g_t(k) = \tilde{g}(t, t-k)$ şeklinde yazılırsa lineer sistem aşağıdaki gibi olur:

$$y(t) = \sum_{s=-\infty}^{t-1} \tilde{g}(t, s)u(s) + v(t) \quad (190)$$

Burada $\tilde{g}(t,s)$, $t = s, s+1, \dots$, s zamanındaki girdiye t zamanındaki tepkiyi ifade eder. Fonksiyon $\tilde{g}(t,s)$ ağırlık fonksiyonu olarak bilinir. Denklem 189 denklem 167 ile g_t ifadesi hariç bir paralellik göstermektedir. Genellikle zamanla değişen transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$G_t(q) = \sum_{k=1}^{\infty} g_t(k) q^{-k} \quad (191)$$

1.7.3.1.2. Zamanla Değişen Durum-Uzay Modeli

Durum-uzay modellerinde zaman değişimi basitçe matrislerin zaman değişimi şeklinde aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{aligned} x(t+1, \theta) &= A_t(\theta)x(t, \theta) + B_t(\theta)u(t) + K_t(\theta)e(t) \\ y(t) &= C_t(\theta)x(t, \theta) + e(t) \end{aligned} \quad (192)$$

Tahmin etmek için kullanılan ifade ise aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} \hat{x}(t+1, \theta) &= [A_t(\theta) - K_t(\theta)C_t(\theta)]\hat{x}(t, \theta) + B_t(\theta)u(t) + K_t(\theta)y(t) \\ \hat{y}(y|\theta) &= C_t(\theta)\hat{x}(t, \theta) \end{aligned} \quad (193)$$

Sonuç olarak bu ifade

$$\begin{aligned} \hat{y}(y|\theta) &= \sum_{k=1}^{\infty} w_t^u(k, \theta)u(t-k) + \sum_{k=1}^{\infty} w_t^y(k, \theta)y(t-k) \\ w_t^u(k, \theta) &= C_t(\theta) \prod_{j=t-k}^{t-1} [A_j(\theta) - K_j(\theta)C_j(\theta)] B_{t-k}(\theta) \\ w_t^y(k, \theta) &= C_t(\theta) \prod_{j=t-k}^{t-1} [A_j(\theta) - K_j(\theta)C_j(\theta)] K_{t-k}(\theta) \end{aligned} \quad (194)$$

şeklinde yazılır.

1.7.3.1.3. Lineer Olmayan Sistemlerin Lineerleştirilmesi

Zamanla değişen sistemlerin en yaygın kullanımı belirli bir yörünge etrafında lineer olmayan sistemlerin lineerleştirilmesi ile ilgilidir. Lineer olmayan sistemlerin aşağıdaki gibi tanımlandığını varsayalım:

$$\begin{aligned}x(t+1) &= f(x(t), u(t)) + r(x(t), u(t))w(t) \\ t(t) &= h(x(t)) + m(x(t), u(t))v(t)\end{aligned}\quad (195)$$

Düzensizlik terimleri $\{w(t)\}$ ve $\{v(t)\}$ 'nin beyaz ve küçük olduğu ve sistemin nominal, düzenli davranışı $(w(t) \equiv 0; v(t) \equiv 0)$ girdi dizisi $u^*(t)$ ve yörünge $x^*(t)$ 'ye karşılık gelmektedir. Lineer olmayan terimler ihmal edilirse aşağıdaki fark ifadeleri kullanılarak

$$\begin{aligned}\Delta x(t) &= x(t) - x^*(t) \\ \Delta y(t) &= y(t) - h(x^*(t)) \\ \Delta u(t) &= u(t) - u^*(t)\end{aligned}\quad (196)$$

Lineer olmayan denklem aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{aligned}\Delta x(t+1) &= F(t)\Delta x(t) + G(t)\Delta u(t) + \bar{w}(t) \\ \Delta y(t) &= H(t)\Delta x(t) + \bar{v}(t)\end{aligned}\quad (197)$$

Burada

$$F(t) = \left. \frac{\partial}{\partial x} f(x, u) \right|_{x^*(t), u^*(t)} ; \quad G(t) = \left. \frac{\partial}{\partial x} f(x, u) \right|_{x^*(t), u^*(t)} ; \quad H(t) = \left. \frac{\partial}{\partial x} h(x) \right|_{x^*(t)} \quad (198)$$

şeklinde. Burada düzensizlik terimlerinin çarpımları ($\Delta x v$) göz ardı edilmektedir. Denklem 197'deki $\bar{w}(t)$ ve $\bar{v}(t)$ terimleri aşağıdaki kovaryans özellikleri ile beyaz düzensizliktir.

$$\begin{aligned} R_1(t) &= E\bar{w}(t)\bar{w}^T(t) = r(x^*(t), u^*(t))Ew(t)w^T(t)r^T(x^*(t), u^*(t)) \\ R_2(t) &= E\bar{v}(t)\bar{v}^T(t) = m(x^*(t), u^*(t))Ev(t)v^T(t)m^T(x^*(t), u^*(t)) \\ R_{12}(t) &= r(x^*(t), u^*(t))Ew(t)w^T(t)m^T(x^*(t), u^*(t)) \end{aligned} \quad (199)$$

Bu model denklem 195'in lineer, zaman bağımlı nominal yörüngesinin yakınlığında yaklaşık ifadesidir.

1.7.3.2. Lineer Olmayan Durum-Uzay Modelleri

1.7.3.2.1. Genel Model Takımı

Sonlu boyuttaki sistemin genel tanımlaması aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} x(t+1) &= f(t, x(t), u(t), w(t); \theta) \\ y(t) &= h(t, x(t), u(t), v(t); \theta) \end{aligned} \quad (200)$$

Burada $w(t)$ ve $v(t)$ bağımsız rastgele değişkenlerin dizisi ve θ bilinmeyen parametrelerin vektörünü göstermektedir. Denklem 200 ve olasılıksal temelli tahmin edicinin belirlenmesi problemi önemlidir. Aslında lineer olmayan tahmin problemi bazı istisnai özel durumlar hariç sonlu boyutta çözümün olmadığı olarak bilinir. Buna rağmen denklem 200 için tahmin edici oluşturulabilir. Sonuç olarak tahmin edici aşağıdaki formda yazılır:

$$\hat{y}(t|\theta) = g(t, Z^{t-1}; \theta) \quad (201)$$

Daha kolay notasyon için t zamanında girdi-çıkı ölçümlerini göstermek adına aşağıdaki form verilir:

$$Z^t = (y^t, u^t) = (y(1), u(1), \dots, y(t), u(t)) \quad (202)$$

Bu form tanımlama amacı için modelde kullanılır. Sonuç olarak denklem 201 temel model olarak görülebilir. Denklem 201 için kabullerle birlikte ilgili hata tahmini aşağıdaki gibidir:

$$\varepsilon(t, \theta) = y(t) - g(t, Z^{t-1}; \theta) \quad (203)$$

1.7.3.2.2. Lineer Olmayan Simülasyon Modeli

Özellikle denklem 200'den elde edilen tahmin edicinin basit hali $w(t)$ süreç düzensizliğini ihmal etmektedir ve aşağıdaki gibi kabul edilir:

$$\begin{aligned} x(t+1, \theta) &= f(t, x(t, \theta), u(t), 0; \theta) \\ \hat{y}(t|\theta) &= h(t, x(t, \theta), u(t), 0; \theta) \end{aligned} \quad (204)$$

$\hat{y}(t|\theta)$ gerçek girdiler kullanılarak gürültüsüz model denklem 200 simülasyonu ile oluşturulduğundan simülasyon model tahmin edici olarak adlandırılır. Açıkça simülasyon modeli sürekli zaman tanımlamasından başlanarak kullanılması basittir:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} x(t, \theta) &= f(t, x(t, \theta), u(t), 0; \theta) \\ \hat{y}(t|\theta) &= h(t, x(t, \theta), u(t), 0; \theta) \end{aligned} \quad (205)$$

1.7.4. Parametre Tahmin Metotları

1.7.4.1. Parametre Tahmini Metotlarında Temel Prensipler

Belirli bir model yapısı olarak seçilen M , farklı modeller için parametre vektörü $\theta \in D_M \subset \mathbb{R}^d$ kullanılarak parametrize edilerek $M(\theta)$ şeklinde ifade edilebilir. Sonuç olarak bu model takımı aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$M^* = \{M(\theta) | \theta \in D_M\} \quad (206)$$

Oluşturulan sistemde girdi-çıkı verileri aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$Z^N = [y(1), u(1), y(2), u(2), \dots, y(N), u(N)] \quad (207)$$

Buradaki problem uygun parametre vektörü $\hat{\theta}_N$ 'nin uygun değerini seçmek için Z^N 'deki girdi-çıkı verilerinin nasıl kullanılacağına karar verilmesidir. Şeklen ifade etmek gerekecekse aşağıdaki gibi D_M kümesi Z^N verilerine eşleştirilir.

$$Z^N \rightarrow \hat{\theta}_N \in D_M \quad (208)$$

Gözlem verilerinin değerlendirilmesini tanımlamak için farklı modellerin becerileriyle bir aracın tespiti gereklidir. Belirli bir modelin $M(\theta_*)$ tahmini hatası aşağıdaki gibidir:

$$\varepsilon(t, \theta_*) = y(t) - \hat{y}(t | \theta_*) \quad (209)$$

Veri takımı Z^N bilindiğinde bu hata değeri $t=1, 2, \dots, N$ için hesap edilir. İyi bir model gözlem verilerinin uygulanmasıyla hatanın en küçük olduğu durum ile sağlanır. Burada çeşitli tahmin edici fonksiyonların seçiminde önemli derecede bir esneklik vardır ve tahmin performansı bakımından iyi bir modelin tanımlanmasında kolaylık sağlar.

Sonuç olarak parametre tahmininde temel prensip aşağıdaki gibidir:

Z^1 'ye bağlı olarak tahmini hata $\varepsilon(t, \theta)$ denklem 206 kullanılarak hesaplanır.

Tahmini hata $\varepsilon(t, \hat{\theta}_N)$ $t=1,2,\dots,N$ mümkün olduğunca en küçük değerde olabilmesi için $\hat{\theta}_N$ seçilir.

Buradaki problem en küçük değer ifadesinin nasıl tanımlanacağı olmaktadır. Bunun için bir ε büyüklüğünü ölçen sayısal-değer normu veya kriter fonksiyonu oluşturmak çözüm yöntemlerinden birisidir.

1.7.4.2. Tahmini Hatanın Minimum Edilmesi

Denklem 209'daki tahmini-hata dizisi R^N uzayında bir vektördür. Bu vektörün büyüklüğü kuadratik veya kuadratik olmayan bir norm kullanılarak hesap edilir. Böylece önemli derecede bir seçim şansı doğmaktadır. Hata-tahmin dizisi, uygun lineer filtreleme $L(q)$ ile aşağıdaki gibi filtrelendir:

$$\varepsilon_F(t, \theta) = L(q)\varepsilon(t, \theta) \quad 1 \leq t \leq N \quad (210)$$

Sonuç olarak norm aşağıdaki gibidir:

$$V_N(\theta, Z^N) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \ell(\varepsilon_F(t, \theta)) \quad (211)$$

Burada $\ell(.)$ sayısal-değer (genellikle pozitif) fonksiyonudur. Z^N veri seti için $V_N(\theta, Z^N)$ fonksiyonu θ parametresinin iyi tanımlanmış sayısal-değer fonksiyonudur. Bu $M(\theta)$ modelinin doğal olarak doğruluk ölçüsü kabul edilir. Tahmini $\hat{\theta}_N$ denklem 211'in minimum olması sağlanarak elde edilir:

$$\hat{\theta}_N(Z^N) = \arg \min_{\theta \in D_M} V_N(\theta, Z^N) \quad (212)$$

Burada ‘arg min’ fonksiyonu minimize eden argüman manasına gelmektedir. θ ’nın tahmini için çok iyi bilinen ve çok fazla kullanılan prosedürler mevcuttur. Genel bir ifade kullanılacaksa denklem 212’ye karşılayan yaklaşımların tamamı hata-tahmin tanımlama yöntemleri olarak isimlendirilir. Kendi isimleri ile özelleştirilmiş metotlar $\ell(\cdot)$, $L(\cdot)$, model yapısı ve bazı durumlardaki minimum değere ulaşacak metotların seçimine bağlı olarak elde edilir.

L filtresinin etkisi, tahmin hatalarını geçici olmayan özellikleriyle belirlerken ekstra kolaylık sağlamaktır. Açıkça tahmin edici lineer ve zamandan bağımsız ve y ve u skaler ise ε filtrelemesinin sonucu, önce girdi-çıkı verilerinin filtrelemesi ve sonra tahmin edicinin uygulamasıyla aynıdır. Eğer denklem 175’teki gibi bir model uygulanacaksa filtreleme hatası $\varepsilon_F(t, \theta)$ filtreleme hatası aşağıdaki gibi yazılır:

$$\varepsilon_F(t, \theta) = L(q)\varepsilon(t, \theta) = [L^{-1}(q)H(q, \theta)]^{-1} [y(t) - G(q, \theta)u(t)] \quad (213)$$

$\ell(\cdot)$ ’nin seçiminde ilk aday olan kuadratik form aşağıdaki gibidir:

$$\ell(\varepsilon) = \frac{1}{2} \varepsilon^2 \quad (214)$$

Bu standart seçim, analiz ve hesaplamalar için uygundur. Uygunsuz verilerdeki doğruluk sorunu diğer normlara yönlendirebilir. En iyi normun önceden bilinmediği durumlarda normun parametrize edilmesi güvenilirdir:

$$\ell(\varepsilon, \theta) \quad (215)$$

Genellikle normun parametrizasyonu modelin parametrizasyonundan bağımsızdır:

$$\theta = \begin{bmatrix} \theta' \\ \alpha \end{bmatrix} : \ell((\varepsilon, \theta), \theta) = \ell((\varepsilon, \theta'), \alpha) \quad (216)$$

1.7.4.3. Parametrelerin Tahmini İçin Yöntemler

$V(\theta)$ fonksiyonunun nümerik olarak minimize edilmesi için uygulanan metotlar, iteratif olarak minimum noktasındaki tahmini güncellerler. Bu durum aşağıdaki formüle göre gerçekleştirilir:

$$\hat{\theta}^{(i+1)} = \hat{\theta}^{(i)} + \alpha f^{(i)} \quad (217)$$

Bu denklemde $f^{(i)}$, bir önceki iterasyondan elde edilen $V(\theta)$ 'ya bağlı olarak araştırma yönünü belirtir. α , $V(\theta)$ değerinin azaltılması için uygulanan pozitif sabittir. $f^{(i)}$ 'nin tanımlaması için nümerik minimize metotları üç gruba ayrılır:

- Yalnızca fonksiyon değerlerinin kullanıldığı metotlar
- V fonksiyon değerlerinin yanı sıra gradyanının da kullanıldığı metotlar
- Fonksiyon değerlerinin, gradyanın ve Hessian matrisinin kullanıldığı metotlar

3.grubun tipik örneği olan Newton algoritmasında, denklem 217'deki düzeltme "Newton" yönünde aşağıdaki gibi seçilir:

$$f^{(i)} = -\left[V''(\hat{\theta}^{(i)}) \right]^{-1} V'(\hat{\theta}^{(i)}) \quad (218)$$

2. grubun en önemli alt sınıfı quasi-Newton metotlarında, bir şekilde Hessian matrisi oluşturulur ve denklem 218 kullanılır. 1. grupta ise ya fark yaklaşımı ile tahmini gradyan oluşturulur ve quasi-Newton metotları uygulanır ya da özel araştırma şablonu oluşturulur. Bu metotlar hesaplama etkinliği, nümerik stabilite ve yakınsama kriteri bakımından ayrı ayrı avantajlara sahiptir. Bu sebepten dolayı literatürde yer alan metotlar gösterilecektir. Sayısal çıktı verilerinin özel durumları ve kuadratik kriter aşağıdaki gibidir:

$$V_N(\theta, Z^N) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{1}{2} \varepsilon^2(t, \theta) \quad (219)$$

Denklem 219'un gradyanı ise:

$$V_N'(\theta, Z^N) = -\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \psi(t, \theta) \varepsilon(t, \theta) \quad (220)$$

şeklindedir. ψ , tahmini çıktının gradyan matrisidir. Araştırma şablonunun genel yapısı aşağıdaki gibidir:

$$\hat{\theta}_N^{(i+1)} = \hat{\theta}_N^{(i)} - \mu_N^{(i)} \left[R_N^{(i)} \right]^{-1} V_N'(\hat{\theta}_N^{(i)}, Z^N) \quad (221)$$

Bu denklemde $\hat{\theta}_N^{(i)}$ i. iterasyondaki parametre değerini, $R_N^{(i)}$ araştırma yönünü değiştiren matrisi, $\mu_N^{(i)}$ ise amaç fonksiyonunun her zaman minimize olması için adım büyüklüğünü ifade etmektedir.

$R_N^{(i)}$ 'nin en basit şekli birim matris olarak yazılır:

$$R_N^{(i)} = I \quad (222)$$

Gradyan veya en dik iniş (steepest-descent) metodunda denklem 222 denklem 221'de kullanılır. Bu metot minimum değeri yakalamakta oldukça etkisizdir. Newton metodları daha iyi sonuç vermektedir. Denklem 219 için Hessian matrisi

$$V_N''(\theta, Z^N) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \psi(t, \theta) \psi^T - \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \psi'(t, \theta) \varepsilon(t, \theta) \quad (223)$$

şeklindedir. Burada $\psi'(t, \theta)$, $\varepsilon(t, \theta)$ teriminin Hessian matrisidir. Newton metodunda $R_N^{(i)}$ terimi aşağıdaki gibidir:

$$R_N^{(i)} = V_N''(\hat{\theta}_N^{(i)}, Z^N) \quad (224)$$

Fakat ψ' 'nin bütün terimlerini hesap edebilmek oldukça güçtür. Bir θ_0 değerinin olduğunu düşünürsek tahmini hatalar $\varepsilon(t, \theta_0) = e_0(t)$ sıfıra eşittir. Bu değer $E V_N(\theta, Z^N)$

'nin global minimum noktasıdır. θ_0 'ın yakınsama için $E\psi'(t, \theta)e_0(t) = 0$ olduğundan denklem 223'ün ikinci toplam ifadesi sıfır olacaktır. Sonuç olarak Hessian matrisi aşağıdaki gibidir:

$$V_N''(\theta, Z^N) \approx \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \psi(t, \theta) \psi^T(t, \theta) = H_N(\theta) \quad (225)$$

Minimizasyon problemi için Newton metotları uygulandığında, minimuma yakınlığında yalnızca Hessian matrisinin doğru bir şekilde tahmin edilmesine gerek vardır. Bu sebepten dolayı Newton metotları kuadratik denklemler için tek-adım yakınsaklığı için dizayn edilir. Güncel iterasyon değeri ile minimum arasında fonksiyon değerleri kuadratik fonksiyonlarla iyi derecede yakınsayamadığında denklem 218'deki Hessian matrisinin etkisi çok önemli değildir. Ayrıca denklem 223'ün son teriminin göz ardı edilmesiyle tahmini Hessian matrisi her zaman yarı pozitif tanımlı matris olur. Sonuç olarak araştırma yönünü değiştirecek matris aşağıdaki gibidir ve bu yöntem Gauss-Newton metodu olarak bilinir.

$$R_N^{(i)} = H_N(\hat{\theta}_N^{(i)}) \quad (226)$$

Denklem 225'teki ifade yarı pozitif tanımlı matris olsa bile tekil veya tekile yakın olabilir. Bu durum modelin parametrize olmaması veya yeterli veri olmaması durumunda karşımıza çıkar. Böylece denklem 221'de bazı nümerik problemler ortaya çıkar. Bu problemin üstesinden gelmek için geliştirilen ve regülasyon teknikleri olarak bilinen yöntemler mevcuttur. Bu tekniklerden Levenberg-Marquardt Hessian matrisi için aşağıdaki yaklaşım kullanılır:

$$R_N^{(i)}(\lambda) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \psi(t, \hat{\theta}_N^{(i)}) \psi^T(t, \hat{\theta}_N^{(i)}) + \lambda I \quad (227)$$

Burada λ adım büyüklüğü parametresinden ziyade iterasyonda yakınsamayı kontrol etmek için kullanılan pozitif sayıdır. Sonuç olarak denklem 221'deki $\mu_N^{(i)} = 1$ 'dir. Gauss-Newton metodunda $\lambda = 0$ dır (Ljung, 1999).

Son olarak Trust Region Reflective Newton (lsqnonlin) metodunda, güven bölgesi amaç fonksiyonunu model fonksiyonu ile temsil etmesini ifade eder. Burada model fonksiyonu kuadratik ikinci derece Taylor serisidir. Büyük ölçekli problemlerde yaklaşık amaç fonksiyonu alt uzayda modellenir. Yansıtıcı optimizasyon fikri, parçalı haritalama fonksiyonuyla normalde sınırlandırılmış optimizasyon alanını sınırlandırılmamış olanla eşleştirerek hesaplamaları basitleştiren bir optimizasyondur. İteratif araştırma algoritmasını yeniden genel bir formda aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\hat{\theta}_{k+1} = \hat{\theta}_k + \alpha_k s_k \quad (228)$$

Burada, ikinci terim, diğer Newton yöntemlerine benzemekle birlikte, birkaç alt algoritmanın bir sonucu olduğu için, kararlılığı kolayca kapalı formda yazılmaz. Adım boyutu α_k yukarıda belirtilen diğer durumlara benzer şekilde değerlendirilir.

Araştırma yönü s_k alt problem çözümüdür ve q 'nin minimumu aşağıdaki gibidir:

$$\min_s \left\{ q(s) = \frac{1}{2} s^T M_k s + s^T g_k, \text{ öyleki } \|D_k^{-1} s\| \leq \Delta_k, s \in S_k \right\} \quad (229)$$

Burada $q(s)$ daha büyük olan amaç fonksiyonunun kuadratik Taylor serisi yaklaşımıdır. Güncel koordinat etrafında geçerli bir yaklaşım olduğundan $\hat{\theta}_k$, D_k 'nin karakteristik sınırları ve Δ_k , s 'yi sınırlar. Bu da sürecin iteratif yapısını gizlemektedir ve q her bir k iterasyonu için yeniden hesap edilir. Ayrıca burada M_k konsept olarak amaç fonksiyonunun ikinci derece matrisi olarak düşünülebilir (Mask, 2011).

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME

2.1. Mariner Teknesi ve Manevra Simülasyonları

Tablo 2’de görüleceği üzere Danimarka, Lyngby’de yatay düzlemsel mekanizma deneyleri gerçekleştirilmiş Mariner teknesinin ana boyutları ve diğer büyüklükleri verilmiştir (Fossen, 1994):

Tablo 2. Mariner teknesinin ana boyutları ve diğer büyüklükleri

Parametre	Değer
Loa (m)	171.80
Lpp (m)	160.93
B (m)	23.17
T (m)	8.23
Deplasman (m ³)	18541
u ₀ (knot)	15
m'	798E-5
I _z '	39E-5
x _G '	-0.023

Başlangıçta doğrusal rotada üzerinde u₀ hızıyla hareket eden geminin diğer değişkenleri v₀=0, r₀=0 ve δ₀=0 şeklindedir. Sonuç olarak tüm değişkenlerin farklar cinsinden yazımı ve bileşke hız aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$u = u_0 + \Delta u$$

$$v = \Delta v \quad r = \Delta r \quad \delta = \Delta \delta \quad (230)$$

$$U = \sqrt{(u_0 + \Delta u)^2 + \Delta v^2}$$

Mariner teknesi için Abkowitz modeli kullanılarak elde edilmiş yatay düzlemdeki ileri, yanal ve savrulma hareket denklemleri ve fark cinsinden yazılan kuvvetler ve moment büyüklükleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{bmatrix} m' - X_u' & 0 & 0 \\ 0 & m' - Y_v' & m' x_G' - Y_r' \\ 0 & m' x_G' - N_v' & I_z' - N_r' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \dot{u}' \\ \Delta \dot{v}' \\ \Delta \dot{r}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X' \\ \Delta Y' \\ \Delta N' \end{bmatrix} \quad (231)$$

$$\begin{aligned} \Delta X' &= X_u' \Delta u' + X_{uu}' \Delta u'^2 + X_{uuu}' \Delta u'^3 + X_{vv}' \Delta v'^2 + X_{rr}' \Delta r'^2 + X_{vr}' \Delta v' \Delta r' \\ &+ X_{\delta\delta}' \Delta \delta'^2 + X_{u\delta\delta}' \Delta u' \Delta \delta'^2 + X_{v\delta}' \Delta v' \Delta \delta' + X_{uv\delta}' \Delta u' \Delta v' \Delta \delta' \end{aligned} \quad (232)$$

$$\begin{aligned} \Delta Y' &= Y_v' \Delta v' + Y_r' \Delta r' + Y_{vvv}' \Delta v'^3 + Y_{vvr}' \Delta v'^2 \Delta r' + Y_{vu}' \Delta v' \Delta u' + Y_{ru}' \Delta r' \Delta u' \\ &+ Y_{\delta}' \Delta \delta' + Y_{\delta\delta\delta}' \Delta \delta'^3 + Y_{\delta u}' \Delta \delta' \Delta u' + Y_{\delta uu}' \Delta \delta' \Delta u'^2 + Y_{v\delta\delta}' \Delta v' \Delta \delta'^2 \\ &+ Y_{vv\delta}' \Delta v'^2 \Delta \delta' + Y^0_u + Y^0_u \Delta u + Y^0_{uu} \Delta u'^2 \end{aligned} \quad (233)$$

$$\begin{aligned} \Delta N' &= N_v' \Delta v' + N_r' \Delta r' + N_{vvv}' \Delta v'^3 + N_{vvr}' \Delta v'^2 \Delta r' + N_{vu}' \Delta v' \Delta u' + N_{ru}' \Delta r' \Delta u' \\ &+ N_{\delta}' \Delta \delta' + N_{\delta\delta\delta}' \Delta \delta'^3 + N_{\delta u}' \Delta \delta' \Delta u' + N_{\delta uu}' \Delta \delta' \Delta u'^2 + N_{v\delta\delta}' \Delta v' \Delta \delta'^2 \\ &+ N_{vv\delta}' \Delta v'^2 \Delta \delta' + N^0 + N^0_u \Delta u + N^0_{uu} \Delta u'^2 \end{aligned} \quad (234)$$

Bu denklemlerde yer alan kütle, atalet momenti, uzunluk, açı, lineer hız, açısal hız, lineer ivme, açısal ivme, kuvvet ve moment büyüklükleri aşağıdaki gibi boyutsuzlaştırılmıştır:

$$\begin{aligned} m' &= m / \frac{1}{2} \rho L^3 & I_z' &= I_z / \frac{1}{2} \rho L^5 \\ x_G' &= x_G / L & \Delta \delta' &= \Delta \delta / 1 \\ \Delta u', \Delta v' &= \Delta u, \Delta v / U & \Delta r' &= \Delta r / \frac{U}{L} \\ \Delta \dot{u}', \Delta \dot{v}' &= \Delta \dot{u}, \Delta \dot{v} / \frac{U^2}{L} & \Delta \dot{r}' &= \Delta \dot{r} / \frac{U^2}{L^2} \\ \Delta X', \Delta Y' &= \Delta X, \Delta Y / \frac{1}{2} \rho L^2 U^2 & \Delta N' &= \Delta N / \frac{1}{2} \rho L^3 U^2 \end{aligned} \quad (235)$$

Abkowitz matematiksel modelinde denklemin sağ tarafında kalan $\Delta X'$ 10 terimden, $\Delta Y'$ ve $\Delta N'$ 15 terimden oluşmaktadır. Duyarlılık analizi ile değişkenlerin değerlerindeki değişikliklere karşı çözümün nasıl etkilendiği gösterilecektir ve matematiksel model daha az sayıda hidrodinamik katsayıya bağlı olarak yazılabilecektir.

Duyarlılık analizi için doğrusal olmayan metodun kullanıldığı bu çalışmada Şekil 17’de görüleceği gibi ilk adımda herhangi bir simülasyon için (120° S-type, dönme, zigzag 10°/10° ve zigzag 20°/20°) orijinal hidrodinamik katsayılar kullanılarak hareket parametrelerinin zamana bağlı değişimleri elde edilir. İkinci adımda toplam 40 adet olan hidrodinamik katsayılar sırasıyla belirli bir oranda (%10, %30, %50 ve -%10, -%30, -%50) değiştirilir. Üçüncü adımda değiştirilen katsayının neticesinde zamana bağlı yeni hareket parametreleri elde edilmiş olur. Dördüncü adımda hesaplanan duyarlılık değeri için farklı yöntemler mevcuttur. Bunlardan birisi olan Hwang’s metotunda değiştirilen katsayıyla elde edilmiş hareket parametreleri ile asıl katsayıyla elde edilmiş hareket parametreleri arasındaki farkın maksimumu hesaplanır (Hwang 1980). Bir diğer çalışmada ise bu parametrelerin farkları toplanmıştır (Key-Pyo Rhee 1999). Bu çalışmada ise ölçüm değerleri ile model tahminleri arasındaki hata oranını belirlemeye yarayan hataların ortalama kare kökü (rmse) kullanılmıştır. Böylece hidrodinamik katsayıların değişimlerine karşın hareket parametrelerinin orijinal parametrelerle kıyaslanması, zamana bağlı hız eğrileri arasındaki uyumun tespiti sağlanacaktır. Bunun için rmse değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\begin{aligned}
 rmse_u &= \sqrt{\sum_{i=1}^n (u_{orj,i} - u_{yeni,i})^2 / n} \\
 rmse_v &= \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{orj,i} - v_{yeni,i})^2 / n} \\
 rmse_r &= \sqrt{\sum_{i=1}^n (r_{orj,i} - r_{yeni,i})^2 / n}
 \end{aligned} \tag{236}$$

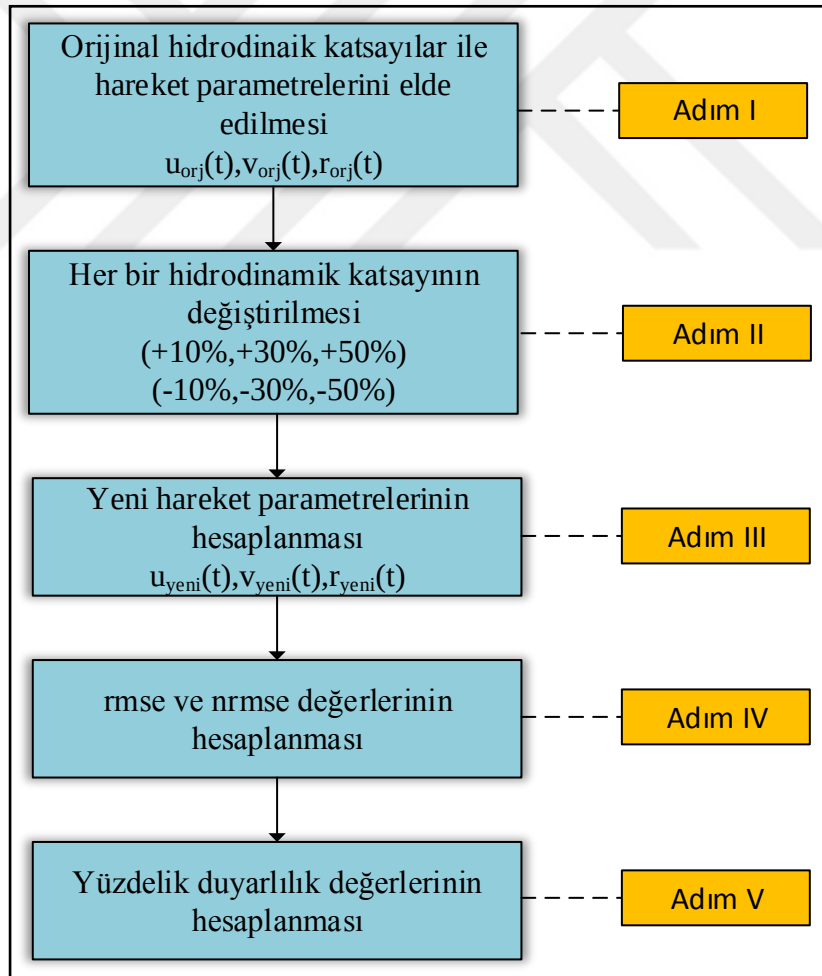
Bu denklemde n simülasyon süresinin zaman adımına oranıyla elde edilen iterasyon sayısını göstermektedir. Ayrıca bu adımda görüldüğü üzere hareket parametreleri ikisinin m/s biriminde diğerinin rad/s birimindedir. Bu değerlerin karşılaştırılabilmesi ve yüzdelik toplam duyarlılık değerinin elde edilebilmesi için aşağıdaki gibi normalize edilmiş hataların ortalama karekökü (nrmse) değerleri hesaplanır:

$$\begin{aligned}
 nrmse_u &= rmse_u / (u_{org,max} - u_{org,min}) \\
 nrmse_v &= rmse_v / (v_{org,max} - v_{org,min}) \\
 nrmse_r &= rmse_r / (r_{org,max} - r_{org,min})
 \end{aligned} \tag{237}$$

Son adımda ise yüzdelik duyarlılık değerleri aşağıdaki gibi hesap edilir:

$$\begin{aligned}
 S_u &= (nrmse_u / nrmse_{toplam}) * 100 \\
 S_v &= (nrmse_v / nrmse_{toplam}) * 100 \\
 S_r &= (nrmse_r / nrmse_{toplam}) * 100 \\
 S_T &= [(nrmse_u + nrmse_v + nrmse_r) / nrmse_{toplam}] * 100 \\
 nrmse_{toplam} &= \sum_{i=1}^k nrmse_{u,i} + nrmse_{v,i} + nrmse_{r,i} \\
 k &= 1, 2, 3, \dots, 40
 \end{aligned} \tag{238}$$

Bu denklemde yer alan k değiştirilmiş toplam hidrodinamik katsayıyı göstermektedir.



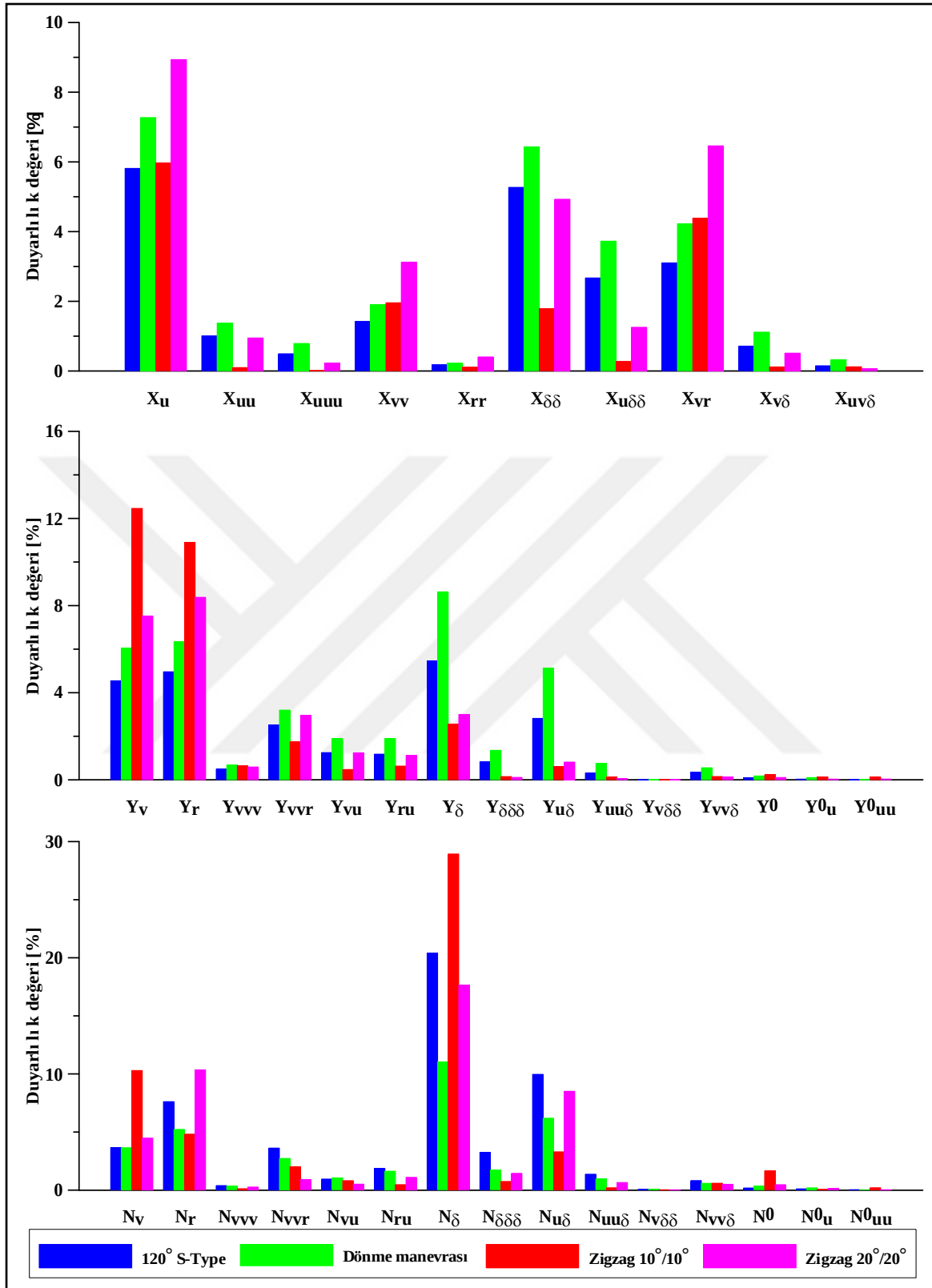
Şekil 17. Duyarlılık işleminin süreci

Bu çalışmada dönme (sancak), zigzag 10°/10° ve zigzag 20°/20° testlerinin yanı sıra 120° S-tip testi de duyarlılık analizi için simüle edildi. Denklemlerin basitleştirilmesinde toplam duyarlılık değeri % 0.25 olarak seçilmiştir ve bu değerin altındaki hidrodinamik katsayılar denklemden çıkartılmıştır. Analizler sonucunda Tablo 3’de görüleceği üzere toplamda 40 terim olan matematiksel modelden 120° S-tip simülasyonunda 10 terim, dönme simülasyonunda 9 terim, zigzag 10°/10° simülasyonunda 17 terim ve son olarak zigzag 20°/20° simülasyonunda 12 terim çıkartılmıştır.

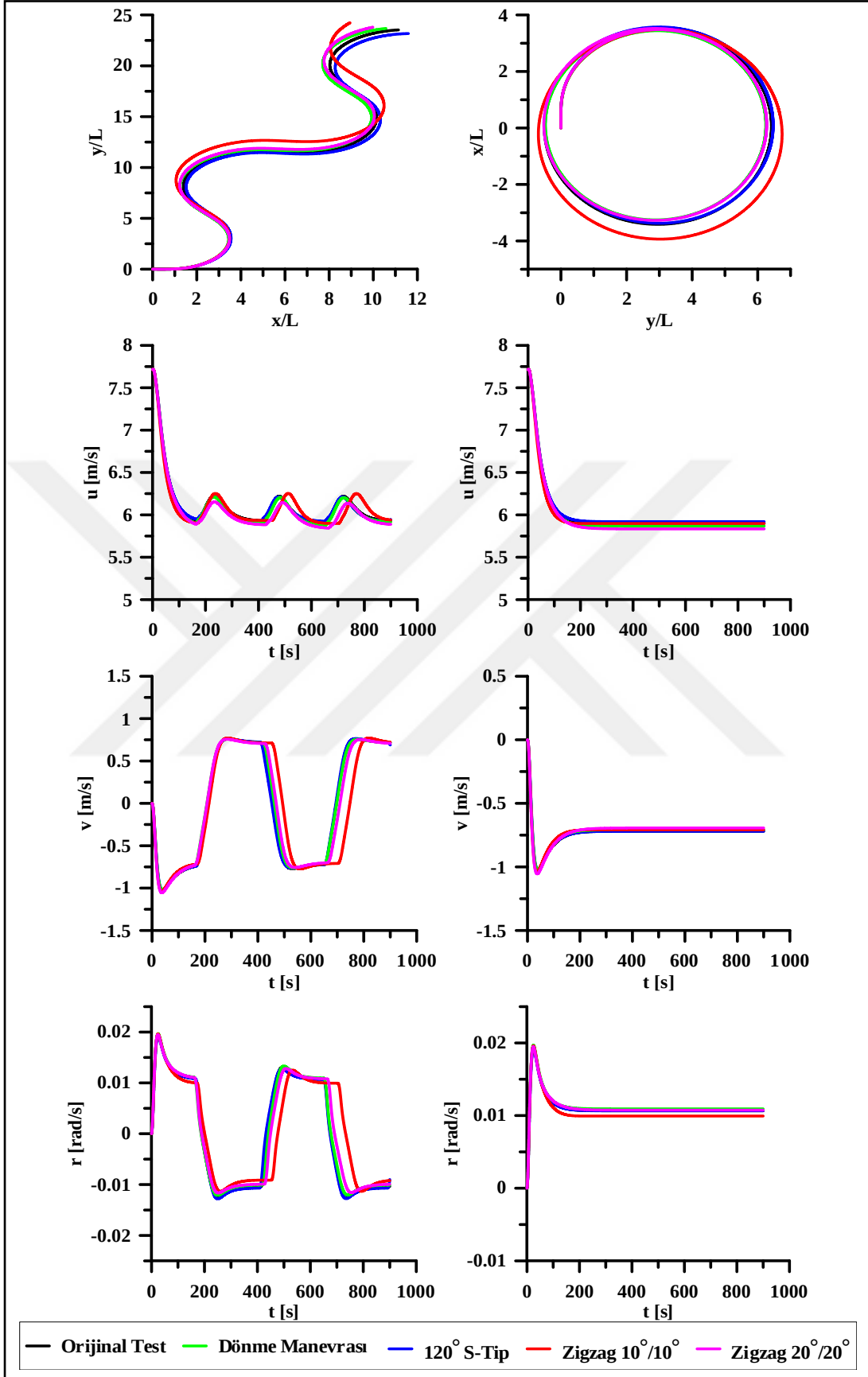
Tablo 3. Eksiltilmiş hidrodinamik katsayılar

	X denklemi	Y denklemi	N denklemi
120° S- tip	$X_{rr}', X_{uv\delta}'$	$Y_{v\delta\delta}', Y^0', Y_u^0', Y_{uu}^0'$	$N_{v\delta\delta}', N^0', N_u^0', N_{uu}^0'$
Dönme(sancak)	X_{rr}'	$Y_{v\delta\delta}', Y^0', Y_u^0', Y_{uu}^0'$	$N_{v\delta\delta}', N_u^0', N_{uu}^0'$
Zigzag 10°/10°	$X_{uu}', X_{uuu}', X_{rr}',$ $X_{v\delta}', X_{uv\delta}'$	$Y_{\delta\delta\delta}', Y_{uu\delta}', Y_{v\delta\delta}', Y_{vv\delta}',$ Y^0', Y_u^0', Y_{uu}^0'	$N_{vvv}', N_{uu\delta}', N_{v\delta\delta}', N_u^0',$ N_{uu}^0'
Zigzag 20°/20°	$X_{uuu}', X_{uv\delta}'$	$Y_{\delta\delta\delta}', Y_{uu\delta}', Y_{v\delta\delta}', Y_{vv\delta}',$ Y^0', Y_u^0', Y_{uu}^0'	$N_{v\delta\delta}', N_u^0', N_{uu}^0'$

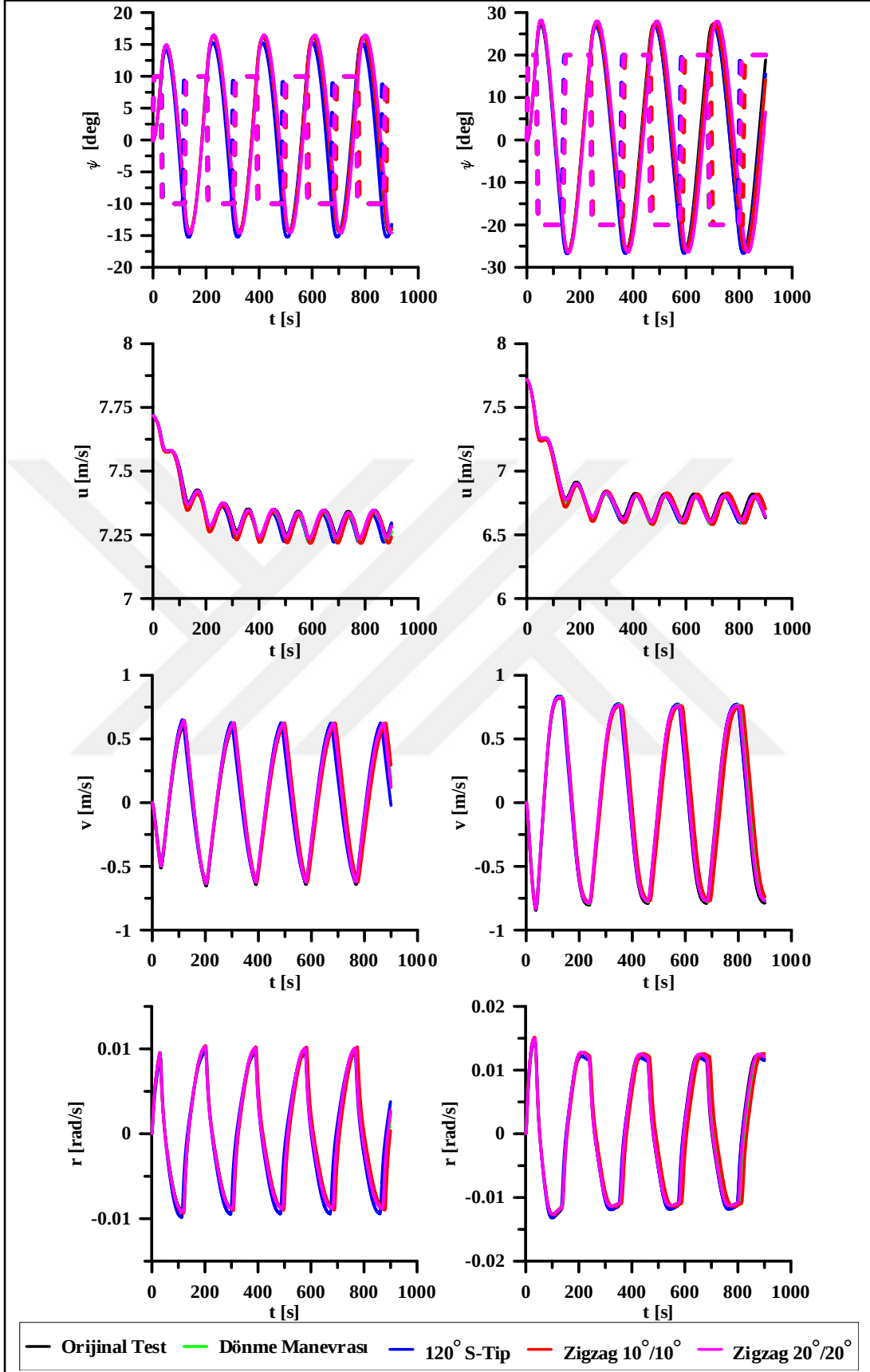
Şekil 18 incelendiğinde X boyuna kuvvetine bağlı olan hidrodinamik katsayılarından X_u' lineer terimin en etkin terim olduğu, dümen açısına bağlı olan $X_{\delta\delta}', X_{u\delta\delta}', X_{v\delta}'$ terimlerinin özellikle büyük dümen açılarında direnç kuvvetine etkisinin büyük olduğu, gemilerin hücum açısından kaynaklı yanal hız bileşenine bağlı terimlerden X_{vv}', X_{vr}' 'nin dikkate alınması gerektiği görülmektedir. Y yanal kuvvetine bağlı olan hidrodinamik katsayılar incelendiğinde lineer terimlerinden Y_v', Y_r', Y_δ' 'nin etkin olduğunu, ikinci mertebeden $Y_{vu}', Y_{ru}', Y_{u\delta}'$ terimleri ise yanal, savrulma ve dümen açısının yanal kuvvetteki etkilerinin teknenin değişen ileri hızıyla baskın olabileceğini ve üçüncü mertebe terimlerden Y_{vvr}' teriminin dikkate alınması gerektiğini düşünebiliriz. Son olarak N savrulma momentine bağlı terimlerde Y yanal kuvvetiyle benzer özellikler göstermekle birlikte özellikle bütün simülasyonlarda N_δ' teriminin en etkin terim olması önemli bir çıkarım olacaktır.



Şekil 18. Hidrodinamik katsayıların duyarlılık değerleri



Şekil 19. Eksiltilmiş matematiksel modellerin 120° S-tip ve dönme manevraları



Şekil 20. Eksiltilmiş matematiksel modellerin zigzag 10°/10° ve zigzag 20°/20° manevraları

Tablo 4. 120° S-tip ve dönme modellerine göre hızların yüzdelik nrmse değerleri

	120° S-Tip			Dönme		
	nrmse_u [%]	nrmse_v [%]	nrmse_r [%]	nrmse_u [%]	nrmse_v [%]	nrmse_r [%]
120° S-Tip	99.33	98.65	98.36	99.06	99.6	99.53
Dönme	98.7	98	98.04	98.29	98.9	98.67
Zigzag 10°/10°	94.64	82.63	82.78	98.07	98.48	96.42
Zigzag 20°/20°	96.34	94.56	93.93	96.7	97.71	99.4

Tablo 5. Zigzag 10°/10° ve zigzag 20°/20° modellerine göre hızların yüzdelik nrmse değerleri

	Zigzag 10°/10°			Zigzag 20°/20°		
	nrmse_u [%]	nrmse_v [%]	nrmse_r [%]	nrmse_u [%]	nrmse_v [%]	nrmse_r [%]
120° S-Tip	95.67	94.2	92.38	97.98	98.24	97.49
Dönme	97.08	98.27	98.67	97.44	95.69	95.62
Zigzag 10°/10°	96.17	95.31	94.21	96.03	90.42	89.45
Zigzag 20°/20°	98.68	98.18	98.55	98.72	98.01	98.18

Tablo 6. Hızların ortalama toplam yüzdelik nrmse değerleri

	Ortalama toplam nrmse [%] (120° S-Tip)	Ortalama toplam nrmse [%] (Dönme)	Ortalama toplam nrmse [%] (Zigzag 10°/10°)	Ortalama toplam nrmse [%] (Zigzag 20°/20°)	Ortalama toplam nrmse [%] (Bütün sim.)
120° S-Tip	98.78	99.40	94.08	97.90	97.54
Dönme	98.25	98.62	98.01	96.25	97.78
Zigzag 10°/10°	86.68	97.66	95.23	91.97	92.88
Zigzag 20°/20°	94.94	97.94	98.47	98.30	97.41

Şekil 19,20’de görüleceği üzere basitleştirmiş matematiksel modeller orijinal hidrodinamik katsayıların kullanılmasıyla yeniden 4 farklı manevra simüle edilmiş ve bu modellerin orijinal verilerle karşılaştırılması sunulmuştur. Tablo 4,5’te u,v,r hızlarının yüzdelik nrmse değerleri, Tablo 6’da ise her bir teste ve bütün testleri içerisine alan ortalama toplam nrmse değerleri verilmiştir. Bütün testleri içerisine alan toplam ortalama incelendiğinde dönmeye göre yapılmış basitleştirmenin en iyisi olduğu 120° S-Tip, dönme, zigzag 20°/20° sonuçlarının birbirlerine yakın olduğu en kötü sonucun ise zigzag 10°/10° ile elde edildiği görülmektedir. Bu durum matematiksel modelde basitleştirmenin ancak

büyük dümen açılarında yapılacak olan testlerdeki duyarlılık analizlerine göre yapılması gerektiğini göstermektedir.

Sistem tanımlama yöntemlerinden birisi olan gri kutu yaklaşımının içerisinde durum-uzay tanımlaması sürekli zaman için aşağıdaki formda yazılır:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Ke(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) + e(t) \\ x(0) &= x_0\end{aligned}\tag{239}$$

Burada $u(t)$ girdi vektörü, $y(t)$ çıktı vektörü, $e(t)$ düzensizlik ve $x(t)$ durum vektörüdür. Durum uzay matrisindeki katsayılar A, B, C, D ve K girdi çıktı verileri kullanılarak tahmin edilir.

Abkowitz modelinin gri kutu yaklaşımıyla çözülebilmesi için durum-uzay yapısı aşağıdaki gibidir:

Girdi:

$$u_1(t) = \delta(t) \quad \text{Dümen açısı [rad]}$$

Durumlar:

$$x_1(t) = \Delta u(t) \quad \text{İleri hız [m/s]}$$

$$x_2(t) = \Delta v(t) \quad \text{Yanal hız [m/s]}$$

$$x_3(t) = \Delta r(t) \quad \text{Savrulma hızı [rad/s]}$$

Çıktılar:

$$y_1(t) = \Delta u(t) \quad \text{İleri hız [m/s]}$$

$$y_2(t) = \Delta v(t) \quad \text{Yanal hız [m/s]}$$

$$y_3(t) = \Delta r(t) \quad \text{Savrulma hızı [rad/s]}$$

Parametreler:

$$X_u', X_{uu}', X_{uuu}', X_{vv}', X_{rr}', X_{vr}', X_{\delta\delta}', X_{u\delta\delta}', X_{v\delta}', X_{uv\delta}'$$

$$Y_v', Y_r', Y_{vv}', Y_{vr}', Y_{vu}', Y_{ru}', Y_{\delta}', Y_{\delta\delta}', Y_{\delta u}', Y_{\delta uu}', Y_{v\delta\delta}', Y_{vv\delta}', Y^0, Y_u^0, Y_{uu}^0$$

$$N_v', N_r', N_{vv}', N_{vr}', N_{vu}', N_{ru}', N_{\delta}', N_{\delta\delta}', N_{\delta u}', N_{\delta uu}', N_{v\delta\delta}', N_{vv\delta}', N^0, N_u^0, N_{uu}^0$$

Yapı:

$$\frac{d}{dt} \Delta u = \left[\Delta X' / (m' - X_{\dot{u}}') \right] (U^2/L)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta v = \left[\frac{(I_z' - N_{\dot{r}}') \Delta Y' - (m' x_{G'}' - Y_{\dot{r}}') \Delta N'}{(m' - Y_{\dot{v}}')(I_z' - N_{\dot{r}}') - (m' x_{G'}' - Y_{\dot{r}}')(m' x_{G'}' - N_{\dot{v}}')} \right] (U^2/L)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta r = \left[\frac{-(m' x_{G'}' - N_{\dot{v}}') \Delta Y' + (m' - Y_{\dot{v}}') \Delta N'}{(m' - Y_{\dot{v}}')(I_z' - N_{\dot{r}}') - (m' x_{G'}' - Y_{\dot{r}}')(m' x_{G'}' - N_{\dot{v}}')} \right] (U^2/L^2)$$

Yukarıdaki durum-uzay yapısından anlaşılacağı üzere dümen açısı δ sisteme girdi ve u, v, r hızları çıktı olarak tanıtılmaktadır. Girdi ve çıktı verileri olarak dört manevraya ait olan veriler kullanılmıştır. Duyarlılık analizi neticesinde elde ettiğimiz matematiksel modellerin hidrodinamik katsayıları gri kutu yaklaşımıyla yeniden tahmin edilmiştir. Bu katsayıların değerleri Tablo 7,8,9'da verilmiştir. Gri kutu yaklaşımında hidrodinamik katsayıların tahmini Matlab 2012a ile gerçekleştirilmiş, güven-gölgesi yansıtıcı Newton yöntemi (lsqnonlin) algoritması kullanılmıştır. Bu yöntemde amaç fonksiyonu ölçüm ve simülasyon çıktıları arasındaki hataların kareköklerinin toplamıdır.

Tablo 7. X denklemindeki hidrodinamik katsayılar [$*10^{-5}$]

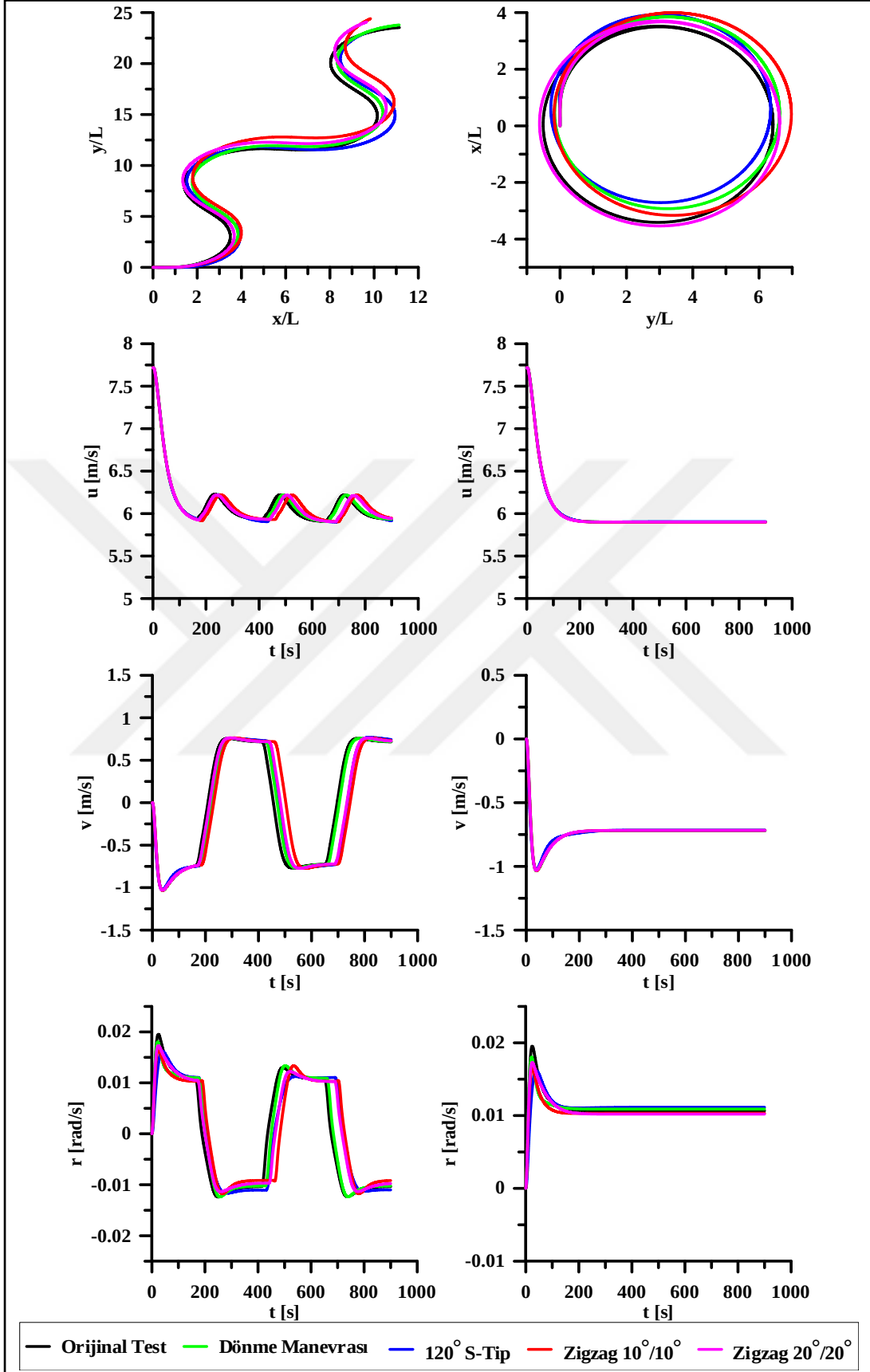
	Orijinal Hidr. Kats.	Gri Kutu Hidr. Kats.	120° S-Tip	Dönme	Zigzag 10°/10°	Zigzag 20°/20°
	(Bütün Kats. ile)		(Eksiltilmiş Kats. ile)			
X_u'	-184	-184	-184	-187	-175	-182
X_{uu}'	-110	-110	-87	-119	-	-51
X_{uuu}'	-215	-215	-236	-254	-	-
X_{vv}'	-899	-899	-921	-1411	-1495	-883
X_{vr}'	18	18	-	-	-	22
$X_{\delta\delta}'$	-95	-95	-106	-94	-104	-101
$X_{u\delta\delta}'$	-190	-190	-210	-180	-209	-207
X_{vr}'	798	798	669	485	360	710
$X_{v\delta}'$	93	93	37	-19	-	28
$X_{uv\delta}'$	93	93	-	-200	-	-

Tablo 8. Y denklemindeki hidrodinamik katsayılar [$\cdot 10^{-5}$]

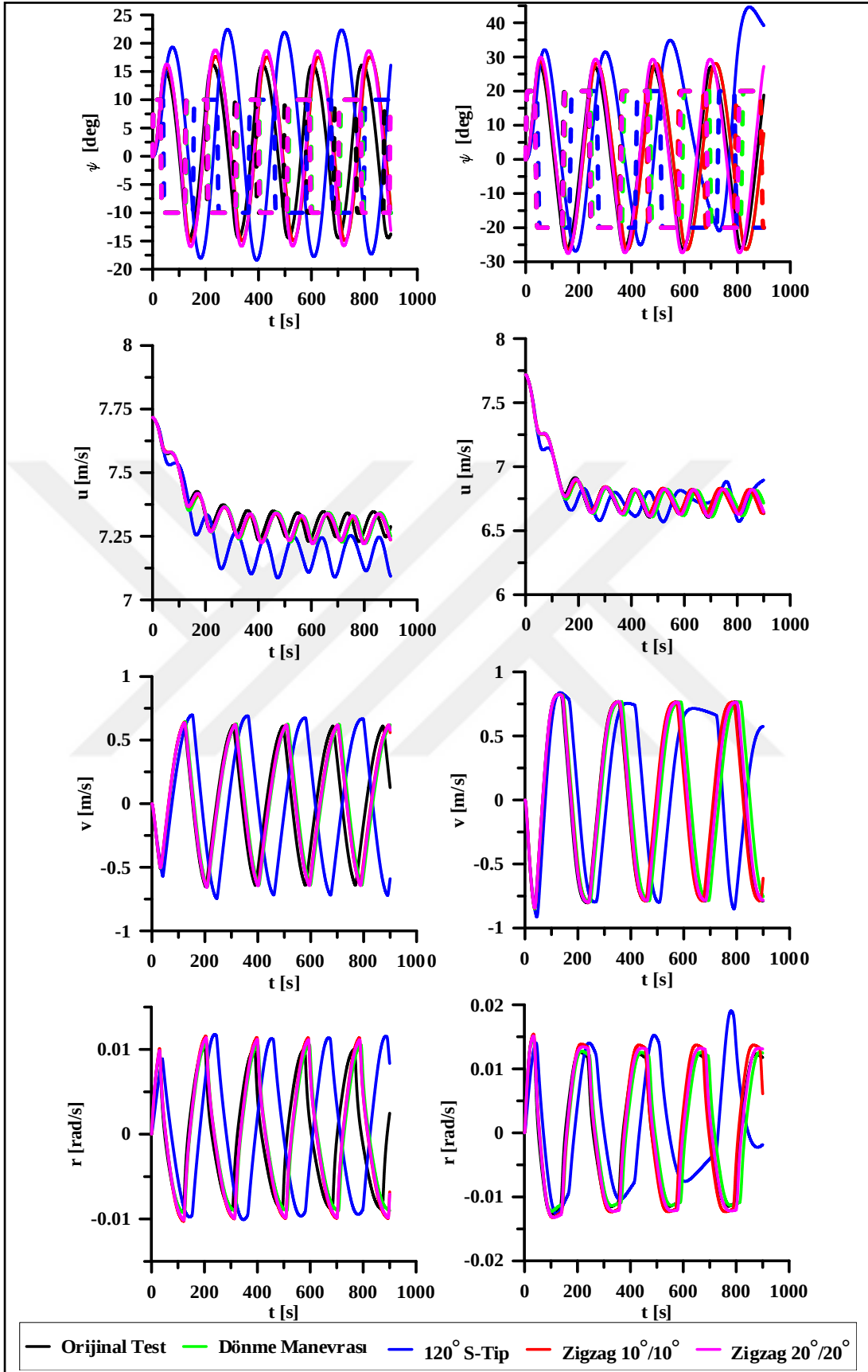
	Orijinal Hidr. Kats.	Gri Kutu Hidr. Kats.	120° S-Tip	Dönme	Zigzag 10°/10°	Zigzag 20°/20°
	(Bütün Kats. ile)		(Eksiltilmiş Kats. ile)			
Y_v'	-1160	-1160	-2560	-1493	-1806	-1910
Y_r'	-499	-499	-1001	-608	-675	-750
Y_{vv}'	-8078	-8078	-38453	-6963	-19452	-27295
Y_{vr}'	15356	15357	-9673	12958	5479	3472
Y_{uv}'	-1160	-1160	-13031	-1784	-4132	-3965
Y_{ur}'	-499	-499	-5876	-752	-1654	-1590
Y_δ'	278	278	416	269	258	223
$Y_{\delta\delta\delta}'$	-90	-90	-8	-90	-	-
$Y_{u\delta}'$	556	556	819	699	491	384
$Y_{uu\delta}'$	278	278	1215	647	-	-
$Y_{v\delta\delta}'$	-4	-4	-	-	-	-
$Y_{vv\delta}'$	1190	1190	-9798	2121	-	-
Y^0	-4	-4	-	-	-	-
Y_u^0	-8	-8	-	-	-	-
Y_{uu}^0	-4	-4	-	-	-	-

Tablo 9. N denklemindeki hidrodinamik katsayılar [$\cdot 10^{-5}$]

	Orijinal Hidr. Kats.	Gri Kutu Hidr. Kats.	120° S-Tip	Dönme	Zigzag 10°/10°	Zigzag 20°/20°
	(Bütün Kats. ile)		(Eksiltilmiş Kats. ile)			
N_v'	-264	-264	384	-319	-366	-452
N_r'	-166	-166	154	-173	-176	-220
N_{vvv}'	1636	1636	1042	5912	0	-5002
N_{vvr}'	-5483	-5483	-2039	-2558	-4856	-6509
N_{uv}'	-264	-264	1445	766	-613	255
N_{ur}'	-166	-166	744	411	-199	235
N_{δ}'	-139	-139	-59	-134	-135	-148
$N_{\delta\delta\delta}'$	45	45	14	45	94	84
$N_{u\delta}'$	-278	-278	-217	89	-111	119
$N_{uu\delta}'$	-139	-139	-498	476	-	786
$N_{v\delta\delta}'$	13	13	-	-	-	-
$N_{vv\delta}'$	-489	-489	-293	2675	1133	1906
N^0	3	3	-	4	4	4
N_u^0	6	6	-	-	-	-
N_{uu}^0	3	3	-	-	-	-



Şekil 21. Eksiltilmiş matematiksel modellerin yeni hidrodinamik katsayılarla 120° S-tip ve dönme manevraları



Şekil 22. Eksiltilmiş matematiksel modellerin yeni hidrodinamik katsayılarla zigzag 10°/10° ve zigzag 20°/20° manevraları

Tablo 10. Yeni katsayılarla 120° S-tip ve dönme modellerine göre hızların yüzdelik nrmse değerleri

	120° S-Tip			Dönme		
	nrmse_u [%]	nrmse_v [%]	nrmse_r [%]	nrmse_u [%]	nrmse_v [%]	nrmse_r [%]
120° S-Tip	96.09	87.43	85.22	99.76	98.82	94.25
Dönme	98.19	93.99	93.91	99.93	99.90	97.12
Zigzag 10°/10°	94.49	80.48	81.57	99.83	99.82	96.22
Zigzag 20°/20°	96.19	87.14	86.87	99.88	99.81	97.27

Tablo 11. Yeni katsayılarla zigzag 10°/10° ve zigzag 20°/20° modellerine göre hızların yüzdelik nrmse değerleri

	Zigzag 10°/10°			Zigzag 20°/20°		
	nrmse_u [%]	nrmse_v [%]	nrmse_r [%]	nrmse_u [%]	nrmse_v [%]	nrmse_r [%]
120° S-Tip	74.97	44.60	40.71	89.76	52.83	53.51
Dönme	92.18	83.46	79.52	95.92	89.30	87.94
Zigzag 10°/10°	93.86	87.62	81.86	97.89	94.97	93.72
Zigzag 20°/20°	93.72	86.89	81.68	99.02	97.43	94.97

Tablo 12. Yeni katsayılar için hızların ortalama toplam yüzdelik nrmse değerleri

	Ortalama toplam nrmse [%] (120° S-Tip)	Ortalama toplam nrmse [%] (Dönme)	Ortalama toplam nrmse [%] (Zigzag 10°/10°)	Ortalama toplam nrmse [%] (Zigzag 20°/20°)	Ortalama toplam nrmse [%] (Bütün sim.)
120° S-Tip	89.58	97.61	53.43	65.37	76.50
Dönme	95.37	98.99	85.06	91.05	92.62
Zigzag 10°/10°	85.51	98.62	87.78	95.53	91.86
Zigzag 20°/20°	90.07	98.98	87.43	97.14	93.41

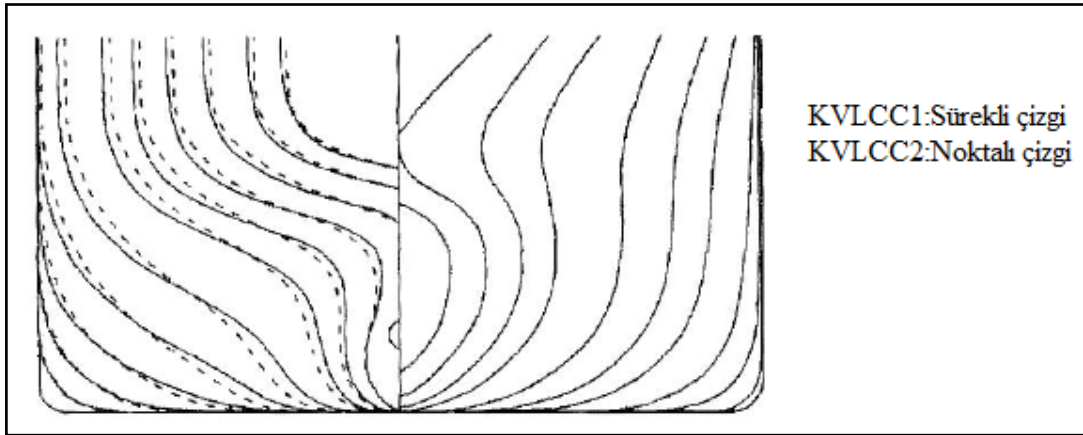
Şekil 21,22’de eksiltilmiş matematiksel modeller için yeni hidrodinamik katsayılar ile gerçekleştirilen simülasyonlar verilmiştir. Ayrıca bu simülasyonlara ait hızların yüzdelik nrmse değerleri Tablo 10,11,12’de verilmiştir. Analizler neticesinde zigzag 20°/20° ye göre oluşturulmuş modelin orijinal değerlere daha yakın sonuç vermesiyle birlikte dönme ve zigzag 10°/10° ile oldukça yakındır. Burada en kötü sonuç 120° S-tip modeline göre elde matematiksel modelde ortaya çıkmaktadır.

2.2. KVLCC1, KVLCC2 Tekneleri ve Manevra Simülasyonları

Simman 2008 çalıştayında tanker (KVLCC1-KVLCC2), konteynır (KCS) ve askeri tekne (DTMB 5415) üzerine manevra performansları açısından çalışmalar yapılmıştır. Tez kapsamında KVLCC1 ve KVLCC2 tankerleri ele alınmıştır. Bu teknelerin belirli oranda ölçeklendirilmiş modelleri ile deney havuzlarında dairesel hareketli mekanizma deneyi NMRI kuruluşu tarafından yatay düzlemsel hareketli mekanizma deneyleri ise MOERİ tarafından gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu deneysel veriler ışığında elde edilen manevra hareketlerinin simülasyonları karşılaştırılması için MARIN kuruluşu tarafından gerçekleştirilen serbest model deneyleri verileri kullanılmıştır (Simman, 2008b).

2.2.1. Tekne Formları ve Ana Boyutlar

İki çeşit kıç tasarımı yapılan tankerlerden KVLCC1 balblı baş kısım ve V-şekilli kıç formuna, KVLCC2 balblı baş kısım ve U-şekilli kıç formuna sahiptir. Şekil 23'te en kesit eğrileri ve Şekil 24 de ise kıç formu gösterilmektedir. Ayrıca Tablo 13 ve Tablo 14'te KVLCC1 ve KVLCC2 teknelerin ana boyutları verilmektedir (Simman, 2008a).



Şekil 23. En kesit eğrileri(postalar) (Simman, 2008a)

Tablo 13. KVLCC1 teknesinin ana boyutları (Simman, 2008a)

	İnşa edilmemiş	MARIN (free)	MOERI (PMM)	NMRI (CMT)
Ölçek	1.000	45.714	58.000	110.000
Ana Boyutlar				
Lpp (m)	320.0	7.0000	5.5172	2.9091
Lwl (m)	325.5	7.1204	5.6121	2.9591
Bwl (m)	58.0	1.2688	1.0000	0.5273
D (m)	30.0	0.6563	0.5172	0.2727
T (m)	20.8	0.4550	0.3586	0.1891
Deplasman (m ³)	312738	3.2737	1.6029	0.2350
S (dümensiz) (m ²)	27320	13.0732	8.1213	2.2579
CB	0.8101	0.8101	0.8101	0.8101
CM	0.9980	0.9980	0.9980	0.9980
LCB (%), fwd+	3.48	3.48	3.48	3.48
Dümen				
Tip	Horn	Horn	Horn	Horn
S (dümen alanı) (m ²)	273.3	0.1308	0.0812	0.0226
Yanal alan (m ²)	136.7	0.0654	0.0406	0.0113
Dönme hızı (deg/s)	2.34	15.8	17.8	24.5
Pervane				
Tip	FP	FP	FP	FP
Kanat sayısı	4	4	4	4
D (m)	9.86	0.204	0.170	0.090
P/D (0.7R)	0.721	0.808	0.721	0.721
Ae/A0	0.431	0.448	0.431	0.431
Dönme	Sağ yön	Sağ yön	Sağ yön	Sağ yön
Göbek çapı/Pervane çapı	0.155	0.165	0.155	0.155
Eklentiler				
Yalpa omurgası	-	-	-	-
Deney koşulları				
T (m)	20.8	0.455	0.359	0.189
Deplasman (m ³)	312738	3.274	1.603	0.235
S (dümen dahil) (m ²)	27593	13.204	8.203	2.280
LCG (m)	11.1	0.244	0.192	0.101
GM (m)	5.71	0.125	0.098	0.052
ixx/B	0.40	0.40	0.40	0.40
izz/Lpp	0.25	0.25	0.25	0.25
Servis hızı				
U (m/s, tam ölçek: kn)	15.5	1.179	1.047	0.760
Fn	0.142	0.142	0.142	0.142

Tablo 14. KVLCC2 teknesinin ana boyutları (Simman, 2008a)

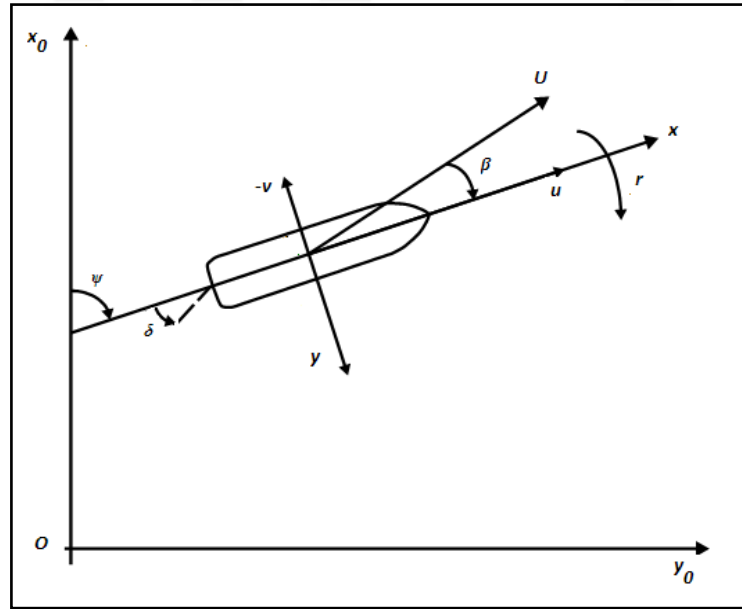
	İnşa edilmemiş	MARIN (free)	MOERI (PMM)	NMRI (CMT)
Ölçek	1.000	45.714	58.000	110.000
Ana Boyutlar				
Lpp (m)	320.0	7.0000	5.5172	2.9091
Lwl (m)	325.5	7.1204	5.6121	2.9591
Bwl (m)	58.0	1.2688	1.0000	0.5273
D (m)	30.0	0.6563	0.5172	0.2727
T (m)	20.8	0.4550	0.3586	0.1891
Deplasman (m ³)	312622	3.2724	1.6023	0.2349
S (dümensiz) (m ²)	27194	13.0129	8.0838	2.2475
CB	0.8098	0.8098	0.8098	0.8098
CM	0.9980	0.9980	0.9980	0.9980
LCB (%), fwd+	3.48	3.48	3.48	3.48
Dümen				
Tip	Horn	Horn	Horn	Horn
S (dümen alanı) (m ²)	273.3	0.1308	0.0812	0.0226
Yanal alan (m ²)	136.7	0.0654	0.0406	0.0113
Dönme hızı (deg/s)	2.34	15.8	17.8	24.5
Pervane				
Tip	FP	FP	FP	FP
Kanat sayısı	4	4	4	4
D (m)	9.86	0.204	0.170	0.090
P/D (0.7R)	0.721	0.808	0.721	0.721
Ae/A0	0.431	0.448	0.431	0.431
Dönme	Sağ yön	Sağ yön	Sağ yön	Sağ yön
Göbek çapı/Pervane çapı	0.155	0.165	0.155	0.155
Eklentiler				
Yalpa omurgası	-	-	-	-
Deney koşulları				
T (m)	20.8	0.455	0.359	0.189
Deplasman (m ³)	312622	3.272	1.602	0.235
S (dümen dahil) (m ²)	27467	13.144	8.165	2.270
LCG (m)	11.1	0.244	0.192	0.101
GM (m)	5.71	0.125	0.098	0.052
ixx/B	0.40	0.40	0.40	0.40
izz/Lpp	0.25	0.25	0.25	0.25
Servis hızı				
U (m/s, tam ölçek: kn)	15.5	1.179	1.047	0.760
Fn	0.142	0.142	0.142	0.142



Şekil 24. KVLCC1 ve KVLCC2 teknelerinin kıç görünümü (Simman, 2008a)

2.2.2. Hareket Denklemleri

Şekil 25’te görüleceği üzere hareketli eksen takımı geminin orta noktasına yerleştirilmiştir ve üç serbestlik dereceli boyuna öteleme, yanal öteleme ve savrulma hareketini temsil eden hareket denklemleri aşağıdaki gibidir:



Şekil 25. Gemi orta noktası merkezli eksen takımı

$$\begin{aligned}
m(\ddot{u} - vr - x_G r^2) &= X \\
m(\dot{v} + ur + x_G \dot{r}) &= Y \\
I_{zz} \dot{r} + mx_G (\dot{v} + ur) &= N
\end{aligned} \tag{240}$$

Yukarıdaki denklemde yer alan X, Y, N boyuna kuvvet, yanıl kuvvet ve savrulma momentinin uygun matematiksel modellerle temsil edilmesiyle hareket denklemleri çözümlerek ilgili büyüklükler hesaplanır.

2.2.3. MMG Modeli Uygulaması

MMG modelinin temel yapısında yatay düzlemdeki kuvvetlerin ve momentin gösterimi aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned}
X &= X_H + X_P + X_R \\
Y &= Y_H + Y_P + Y_R \\
N &= N_H + N_P + N_R
\end{aligned} \tag{241}$$

Yukarıdaki denklemde yer alan tekne, pervane ve dümene ait kuvvet ve moment büyüklüklerinin belirlenmesi gerekmektedir. X doğrultusundaki hidrodinamik tekne kuvveti aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$X_H = -m_x \ddot{u} + X_0 + X_{vv} v^2 + (X_{vr} + m_y) vr + X_{rr} r^2 + X_{vvv} v^4 \tag{242}$$

Yanal tekne hidrodinamik kuvveti ve savrulma momentinin hızlara bağlı lineer olmayan terimlerinin iki farklı şekilde yazılması suretiyle yanıl hidrodinamik kuvvet ve savrulma momenti aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

Model 1:

$$\begin{aligned}
Y_H &= -m_y \dot{v} + Y_r \dot{r} + Y_v v + (Y_r - m_x u) r + Y_{vv} v^3 + Y_{rr} r^3 + Y_{vrr} v^2 r + Y_{vrr} vr^2 \\
N_H &= N_v \dot{v} - J_{zz} \dot{r} + N_v v + N_r r + N_{vv} v^3 + N_{rr} r^3 + N_{vrr} v^2 r + N_{vrr} vr^2
\end{aligned} \tag{243}$$

Model 2:

$$\begin{aligned} Y_H &= -m_y \dot{v} + Y_r \dot{r} + Y_v v + (Y_r - m_x u) r + Y_{|v|v} |v| v + Y_{|v|r} |v| r + Y_{|r|v} |r| v + Y_{|r|r} |r| r \\ N_H &= N_v \dot{v} - J_{zz} \dot{r} + N_v v + N_r r + N_{|v|v} |v| v + N_{|v|r} |v| r + N_{|r|v} |r| v + N_{|r|r} |r| r \end{aligned} \quad (244)$$

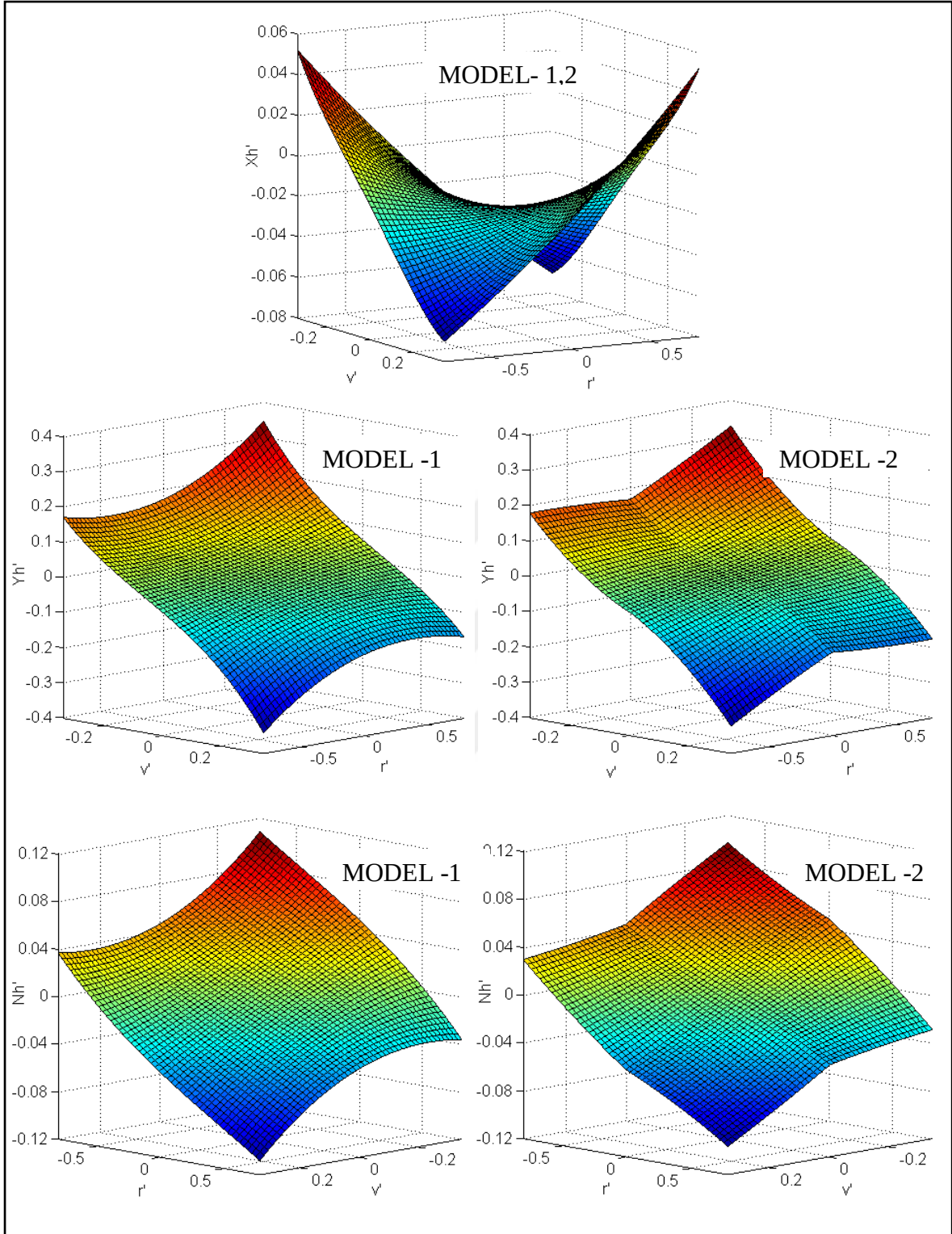
X_0' terimi için ise model deneylerindeki verilerinden yararlanarak servis hızına karşılık gelen direnç kuvvetinden hesap yapılmıştır. $L=7$ m ve $L=320$ m büyüklüğündeki tekneler için ise model deneylerinden direnç tahminin yapıldığı Hughes yönteminden faydalanarak X_0' hesap edilmiştir. Tablo 15'te her bir model direnç testinden yararlanarak tahmin edilmiş farklı büyüklükteki teknelerin servis hızındaki direnç değerleri verilmiştir.

Tablo 15. Servis hızlarına karşılık gelen direnç değerleri

		NMRI			MOERI		
	Lpp (m)	2.9091	7.0000	320	5.5172	7.0000	320
KVLCC1	X_0'	-0.0212	-0.0168	-0.0077	-0.0167	-0.0159	-0.0074
KVLCC2	X_0'	-0.0213	-0.0171	-0.0080	-0.0168	-0.0160	-0.0077

Tekne hidrodinamik kuvveti ve momenti hem dairesel dönme hareketi deneyinde hem de düzlemsel hareket mekanizması deneyinde dümen açısının sıfır konumunda tutulması ile gerçekleştirilmiş verilerden yola çıkılarak hesap edilmiştir. Sonuç olarak tekne kuvveti ve momenti eş zamanlı ölçülmüş itme kuvveti ve dümen normal kuvvetinin ilgili katsayıların ile çarpılması sonucunda elde edilmiş dümen kuvveti ve momentinin çıkartılmasıyla aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned} X_H &= X - (1 - t_p) T_p \\ Y_H &= Y + (1 + a_H) F_N \\ N_H &= N + (x_R + a_H x_H) F_N \end{aligned} \quad (245)$$



Şekil 26. Tekne kuvvetleri ve momentinin yanal hız ve savrulma hızı arasındaki ilişki (CMT-KVLCC1)

NMRI'ya ait model için CMT verilerinden yararlanarak Şekil 26'da görüleceği üzere verilere yüzey uydurulmuştur. Bu yüzeyi temsil eden iki değişkenli polinomun katsayıları hidrodinamik katsayılarla karşılık gelmektedir. MOERI da ise PMM deneyleri gerçekleştirildiğinden $Y_v', N_v', Y_{vvv}', N_{vvv}', Y_{|v|v}', N_{|v|v}'$ terimleri statik hücum deneyinden, $Y_r', N_r', Y_{|r|r}', N_{|r|r}'$ yalnızca savrulma deneyinden, $Y_{vvr}', Y_{vrr}', N_{vvr}', N_{vrr}'$ terimleri ise belirli hücum açısındaki savrulma deneyinden elde edilmiştir. Tablo 16 ve Tablo 17'de teknelerle ait hesap edilmiş hidrodinamik katsayıların boyutsuz büyüklükleri verilmiştir.

Tablo 16. KVLCC1 için hidrodinamik katsayılar

	NMRI (CMT)	MOERI (PMM)		NMRI (CMT)	MOERI (PMM)
X_{vv}'	-0.0742	0.0270	X_{vv}'	-0.0742	0.0270
$X_{vr}' + m_y'$	0.2154	0.1941	$X_{vr}' + m_y'$	0.2154	0.1941
X_{rr}'	0.0121	0.0209	X_{rr}'	0.0121	0.0209
X_{vvvv}'	1.0510	0.0895	X_{vvvv}'	1.0510	0.0895
Y_v'	-0.2968	-0.2688	Y_v'	-0.1720	-0.1905
$Y_r' - m_x'$	0.0550	0.0542	$Y_r' - m_x'$	0.0438	0.0594
Y_{vvv}'	-1.6200	-1.1265	$Y_{ v v}'$	-0.8756	-0.6355
Y_{rrr}'	0.0091	0.0283	$Y_{ v r}'$	0.0739	0.0739*
Y_{vvr}'	0.3616	0.3774	$Y_{ r v}'$	-0.2978	-0.2978*
Y_{vrr}'	-0.3823	-0.4138	$Y_{ r r}'$	0.0232	0.0218
N_v'	-0.1415	-0.1439	N_v'	-0.1583	-0.1506
N_r'	-0.0490	-0.0479	N_r'	-0.0439	-0.0476
N_{vvv}'	-0.0025	0.0834	$N_{ v v}'$	0.0529	0.0497
N_{rrr}'	-0.0111	0.0017	$N_{ v r}'$	-0.0649	-0.0649*
N_{vvr}'	-0.2741	-0.2563	$N_{ r v}'$	0.0560	0.0560*
N_{vrr}'	0.0612	0.0162	$N_{ r r}'$	-0.0129	0.0056

* Aynı değerler kullanılmıştır.

Tablo 17. KVLCC2 için hidrodinamik katsayılar

	NMRI (CMT)	MOERI (PMM)		NMRI (CMT)	MOERI (PMM)
X_{vv}'	-0.0473	0.0199	X_{vv}'	-0.0473	0.0199
$X_{vr}' + m_y'$	0.2241	0.2125	$X_{vr}' + m_y'$	0.2241	0.2125
X_{rr}'	0.0106	0.0189	X_{rr}'	0.0106	0.0189
X_{vvv}'	0.8206	0.2442	X_{vvv}'	0.8206	0.2442
Y_v'	-0.3139	-0.2589	Y_v'	-0.1886	-0.1892
$Y_r' - m_x'$	0.0607	0.0680	$Y_r' - m_x'$	0.0510	0.0737
Y_{vvv}'	-1.5890	-1.4075	$Y_{ v v}'$	-0.8705	-0.6720
Y_{rrr}'	0.0071	0.0234	$Y_{ v r}'$	0.0705	0.0705*
Y_{vvr}'	0.3652	0.3285	$Y_{ r v}'$	-0.3105	-0.3105*
Y_{vrr}'	-0.3915	-0.3843	$Y_{ r r}'$	0.0196	0.0170
N_v'	-0.1371	-0.1360	N_v'	-0.1502	-0.1395
N_r'	-0.0486	-0.0480	N_r'	-0.0422	-0.0479
N_{vvv}'	-0.0311	0.0769	$N_{ v v}'$	0.0329	0.0356
N_{rrr}'	-0.0124	0.0011	$N_{ v r}'$	-0.0716	-0.0716*
N_{vvr}'	-0.2903	-0.2394	$N_{ r v}'$	0.0506	0.0506*
N_{vrr}'	0.0558	0.0068	$N_{ r r}'$	-0.0150	0.0035

* Aynı değerler kullanılmıştır.

Atalet terimleri ile ilgili büyüklükler NMRI'ya ait deney verilerinden elde edilemeyeceğinden ampirik bağıntılar yardımıyla hesap edilmiştir. MOERI için ise Y_v', N_v' terimleri yalnızca yanal öteleme deneyinden, Y_r', N_r' terimleri ise yalnızca savrulma deneyinden elde edilmiştir. Ortak olarak X_u' terimi ampirik bağıntıyla hesap edilmiştir. Sonuç olarak terimlere ait büyüklükler Tablo 18'de verilmiştir.

Tablo 18. KVLCC1 ve KVLCC2 için atalet ile ilgili hidrodinamik katsayılar

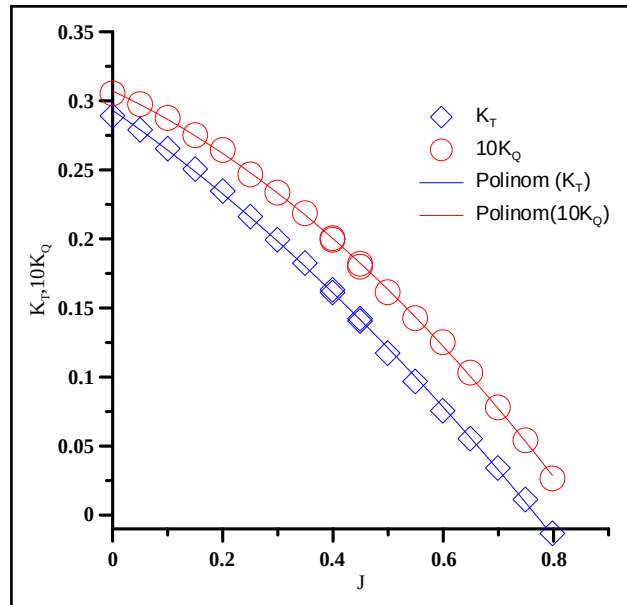
	KVLCC1		KVLCC2	
	NMRI (CMT)	MOERI (PMM)	NMRI (CMT)	MOERI (PMM)
$m'_x(-X'_u)$	0.0369	0.0369	0.0368	0.0368
$m'_y(-Y'_v)$	0.2438	0.2238	0.2438	0.2235
Y'_r	-	-0.0245	-	-0.0211
N'_v	-	-0.0177	-	-0.0163
$N'_r(-J'_{zz})$	0.0124	0.0095	0.0124	0.0095

Pervane hidrodinamik kuvveti ve bağlı olduğu değişkenler sırasıyla aşağıdaki gibi yazılır:

$$X_p = (1 - t_p) T_p = (1 - t_p) \rho n^2 D_p^4 K_T (J)$$

$$K_T (J) = a_0 + a_1 J + a_2 J^2 \quad (246)$$

$$J = u(1 - w_p) / (n D_p)$$



Şekil 27. Açık su pervane karakteristiği (NMRI)

Şekil 27’de görüleceği üzere açık su pervane karakteristiği deneysel verilere ikinci derece polinom uydurulmasıyla hesap edilmiştir. Sonuç olarak NMRI için a_0 , a_1 , a_2 sırasıyla 0.2931, -0.2753, -0.1385 MOERI için 0.3163, -0.3129, -0.095’dir. İtme azalması ve iz katsayısı modeller için kendi kendine sevk testlerinden elde edilmiştir. İtme azalması için model ve diğer tekneleri için sabit kabulü yapılırken, iz katsayısı teknelerin farklı ölçeklerinde değişeceğinden amprik bağıntı yardımıyla hesaplanmıştır. Tablo 19’da ilgili büyüklükler verilmiştir.

Tablo 19. KVLCC1 ve KVLCC2 teknelerinin itme azalması, iz katsayısı ve pervane devir sayısı

	L_{pp} (m)	NMRI			MOERI		
		2.9091	7.0000	320	5.5172	7.0000	320
KVLCC1	t_p	0.189	0.189	0.189	0.197	0.197	0.197
	w_p	0.421	0.392	0.317	0.407	0.404	0.327
	$n(d/s)$	17.69	11.62	1.23	11.43	11.03	1.18
KVLCC2	t_p	0.232	0.232	0.232	0.19	0.19	0.19
	w_p	0.457	0.429	0.356	0.443	0.439	0.342
	$n(d/s)$	17.93	11.76	1.24	11.27	10.83	1.17

KVLCC1 ve KVLCC2 tekneleri için aynı özellikte Horn tipi bir dümen kullanılmaktadır. Tablo 20’de dümenin geometrik büyüklükleri ile bilgi verilmektedir.

Tablo 20. Dümen ile ilgili geometrik büyüklükler

	L_{pp} (m)	NMRI-MOERI			
		2.9091	5.5172	7.0000	320
KVLCC1 KVLCC2	A_R (hareketli kısım)	0.009278	0.033372	0.05372	112.2638
	λ	1.826	1.826	1.826	1.826
	H_R	0.14362	0.272383	0.345587	15.7982

Dümenin hareketiyle meydana gelen hidrodinamik kuvvetler ve moment ve bağlı olduğu değişkenler aşağıdaki gibi yazılır:

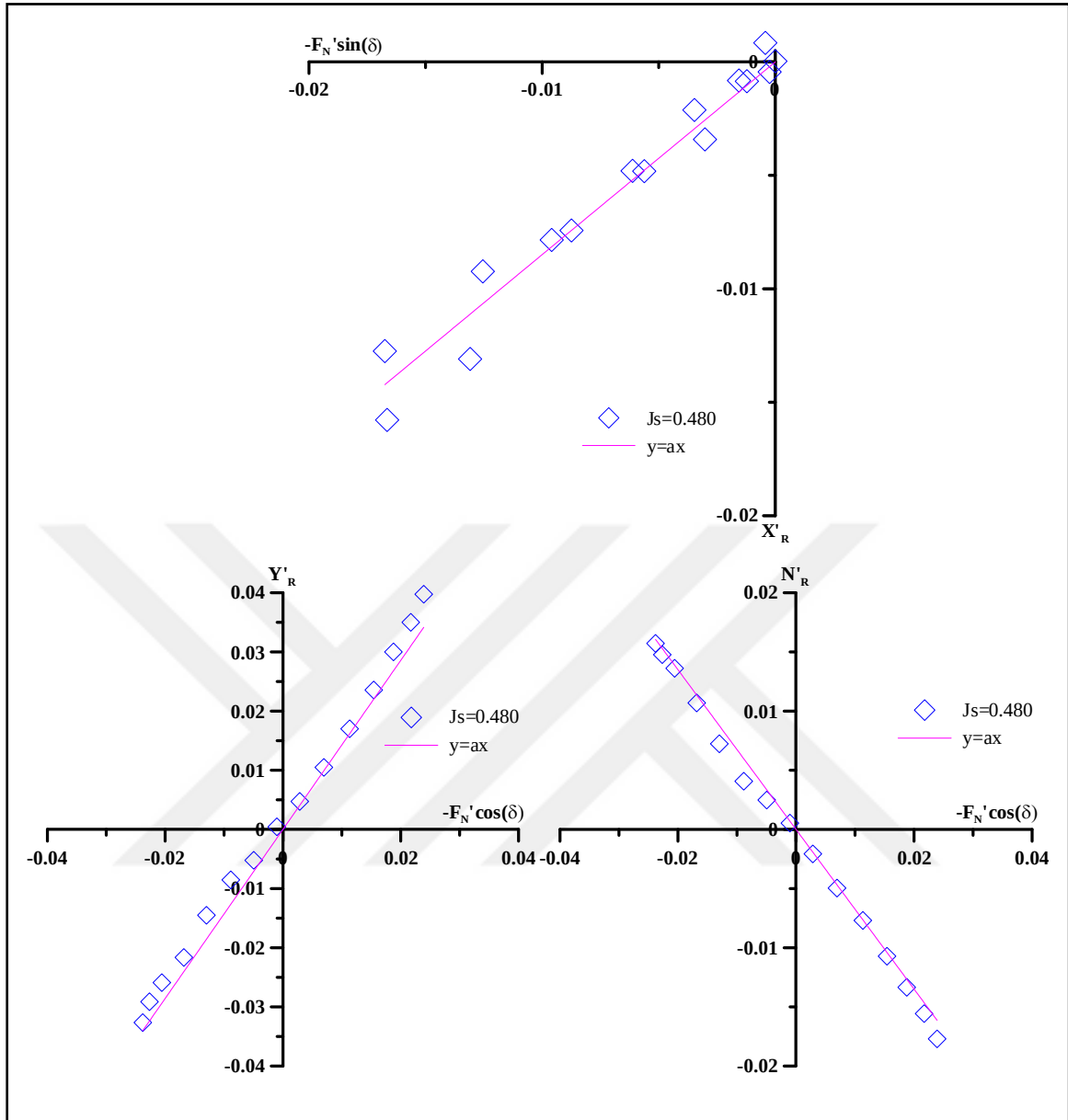
$$\begin{aligned}
X_R &= -(1-t_R) F_N \sin \delta \\
Y_R &= -(1+a_H) F_N \cos \delta \\
N_R &= -(x_R + a_H x_H) F_N \cos \delta
\end{aligned} \tag{247}$$

F_N dümen normal kuvveti ve ilgili denklemler sırasıyla aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$\begin{aligned}
F_N &= \frac{1}{2} \rho f_a A_R U_R^2 \sin \alpha_R \\
f_a &= \frac{6.13\lambda}{\lambda + 2.25} \\
U_R &= \sqrt{u_R^2 + v_R^2} \\
u_R &= \varepsilon u (1 - w_p) \sqrt{\eta \left\{ 1 + k \left(\sqrt{1 + \frac{8K_T}{\pi J^2}} - 1 \right) \right\}^2 + (1 - \eta)} \\
v_R &= U \gamma_R \beta_R = U \gamma_R (\beta - l_R \dot{r}) \\
\alpha_R &= \delta - \text{Arc tan} \left(\frac{v_R}{u_R} \right) \cong \delta - \frac{v_R}{u_R}
\end{aligned} \tag{248}$$

Dümenin farklı açılarda sabitlenerek modelin doğrusal olarak hareket ettirildiği dümen deneyinde yanal hız ve savrulma hızı sıfır olacağından yanal tekne kuvveti ve tekne momenti sıfır olmaktadır. Bundan dolayı toplam kuvvetler ve moment, dümen kuvvetleri ve momentine eşit olup aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{aligned}
X - X_0 - (1-t_p) T_p &= X_R = -(1-t_R) F_N \sin \delta \\
Y &= Y_R = -(1+a_H) F_N \cos \delta \\
N &= N_R = -(x_R + a_H x_H) F_N \cos \delta
\end{aligned} \tag{249}$$



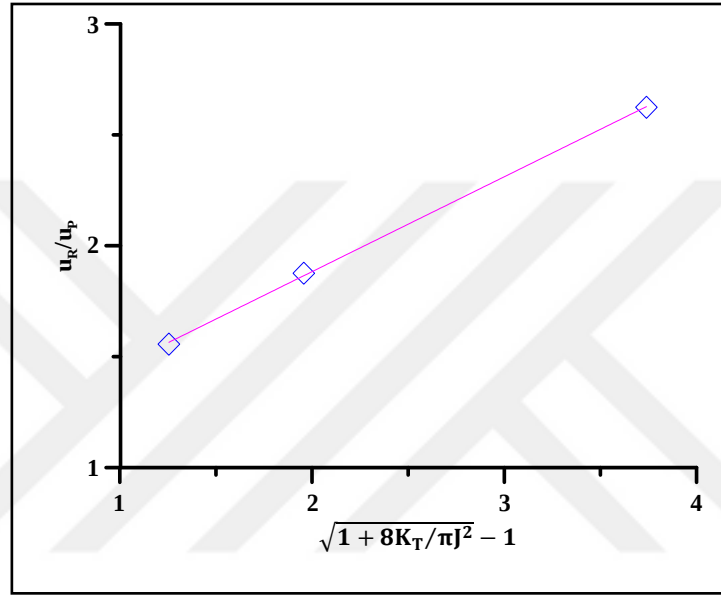
Şekil 28. Tekne dümen etkileşim katsayıları için ilgili büyükler arasındaki ilişkiler (NMRI-KVLCC1)

Şekil 28’de görüleceği üzere X'_R, Y'_R, N'_R ile $F'_N \cos(\delta)$ (veya $F'_N \sin(\delta)$) arasındaki ilişkiden eğri uydurma yardımıyla tekne dümen etkileşim katsayıları elde edilmiştir. Bu değerler servis hızına karşı gelen pervane yüklemesi durumunda belirlenmiştir.

Dümen deneyinde doğrusal hareketten dolayı dümen bölgesine gelen efektif yanal akış hızı sıfıra eşittir ($v_R = 0$). Ayrıca dümen bölgesindeki efektif akış açısı dümen açısına eşit olacaktır. Böylece dümen normal kuvveti aşağıdaki gibi yazılır:

$$F_N = \frac{1}{2} \rho f_a A_R u_R^2 \sin \delta \quad (250)$$

Ölçülen dümen normal kuvvetiyle dümen bölgesindeki boyuna efektif akış hızı hesap edilir. Ayrıca denklem 248'deki boyuna efektif akış hızı formülünden faydalanarak Şekil 29'da görüleceği üzere ilişkiden ε ve k büyüklükleri hesap edilir.



Şekil 29. u_R/u_P ve $\sqrt{1 + 8K_T/\pi^2} - 1$ arasındaki ilişki (NMRI-KVLCC1)

Akış doğrultma faktörü γ_R ve deneysel sabit l_R' , akış doğrultma testinde ölçülen dümen normal kuvvetinin sıfır olduğu koşuldan yola çıkılarak hesap edilmektedir. Normal kuvvet boyutsuzlaştırılarak aşağıdaki gibi elde edilir:

$$F_N' = \frac{A_R f_a}{Ld} (u_R'^2 + v_R'^2) \sin(\delta - v_R'/u_R') \quad (251)$$

Denklem 251'in δ 'ya göre türevi alınırsa

$$\frac{dF_N'}{d\delta} = \frac{A_R f_a}{Ld} (u_R'^2 + v_R'^2) \cos(\delta - v_R'/u_R') \quad (252)$$

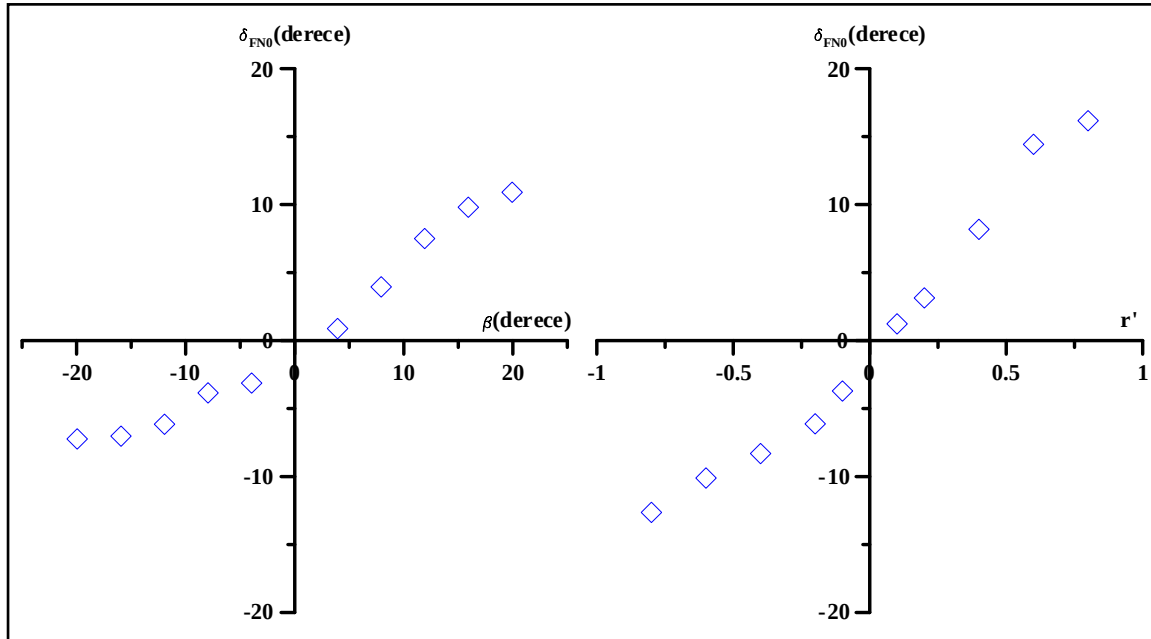
elde edilmiş olur. Sıfır normal kuvveti şartından yola çıkılarak $\delta_{FN0} = v_R' / u_R'$ eşitliğinden denklem 252 aşağıdaki gibi denkleme dönüşür:

$$\left. \frac{dF_N'}{d\delta} \right|_{\delta=\delta_{FN0}} = \frac{A_R f_a}{Ld} u_R'^2 (1 + \delta_{FN0}^2) \quad (253)$$

Sonuç olarak dümen bölgesindeki akış hızının boyuna doğrultudaki bileşeni için aşağıdaki formül elde edilmiş olur:

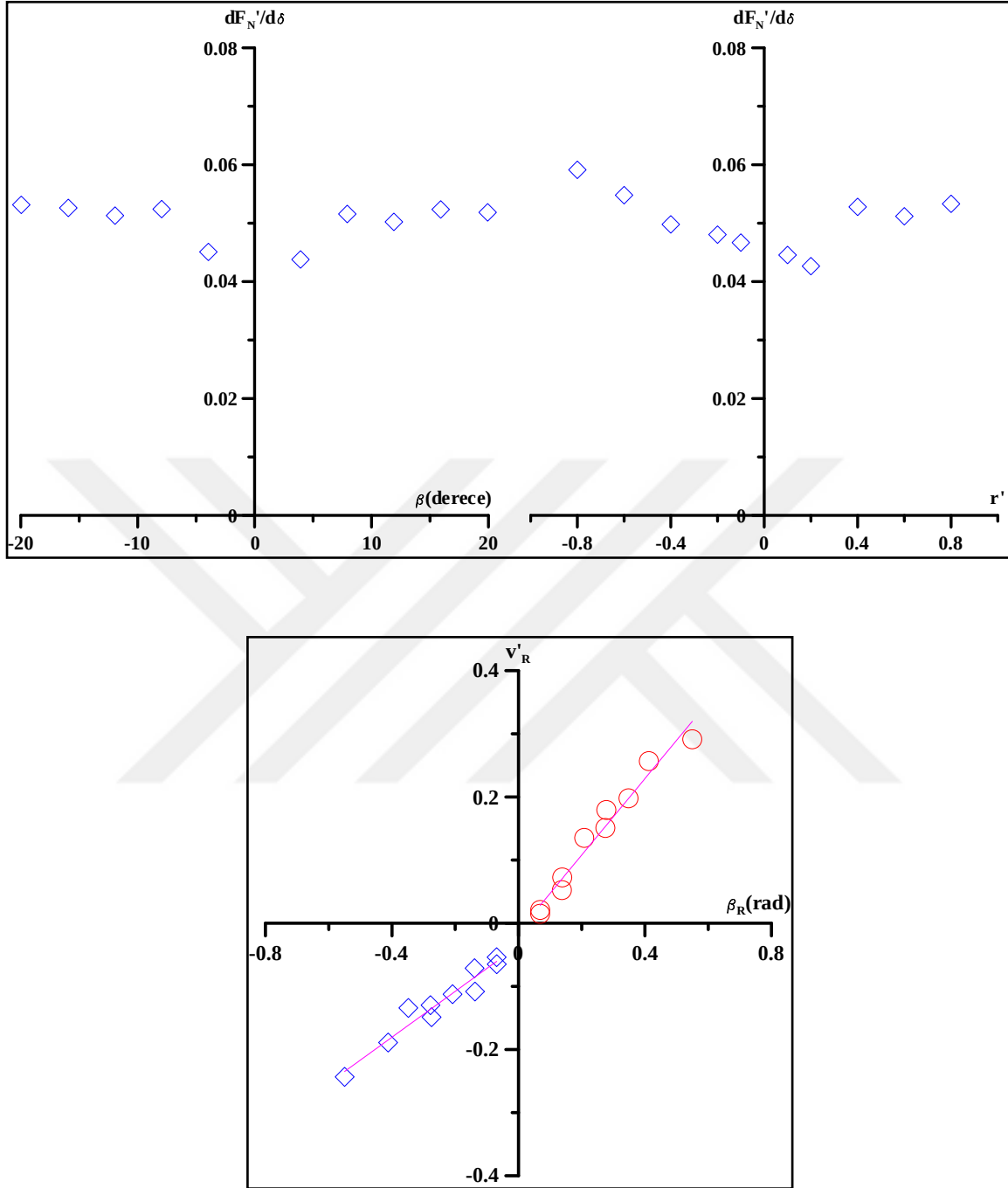
$$u_R' = \sqrt{\left. \frac{dF_N'}{d\delta} \right|_{\delta=\delta_{FN0}} \frac{Ld}{A_R f_a} (1 + \delta_{FN0}^2)} \quad (254)$$

Yukarıdaki denklemde ölçülmüş ve Şekil 30'da görüleceği üzere interpolasyon ile hesap edilmiş δ_{FN0} ve $dF_N'/d\delta$ büyüklüklerinden u_R' hesaplanmış olur. Dümen bölgesinde akış hızının yanal doğrultudaki bileşeni $v_R', v_R' = u_R' \delta_{FN0}$ eşitliğinden hesaplanır. Şekil 31'de $v_R' - \beta_R$ ilişkisinden γ_R ve l_R' hesap edilir.



Şekil 30. Akış doğrultma testinde elde edilmiş δ_{FN0} ve $dF_N'/d\delta$ değerleri

Şekil 30'un devamı



Şekil 31. Yanal efektif akış hızı analiz sonuçları (NMRI-KVLCC1)

Sonuç olarak Tablo 21'de hesap edilmiş parametrelerin büyüklükleri verilmiştir.

Tablo 21.Dümen ile ilgili katsayılar

	KVLCC1		KVLCC2	
	NMRI (CMT)	MOERI (PMM)	NMRI (CMT)	MOERI (PMM)
$1-t_R$	0.849	0.827	0.811	0.710
a_H	0.428	0.501	0.436	0.526
x_H'	-0.407	-0.407	-0.381	-0.374
ε	1.051	1.03	1.12	1.101
k	0.529	0.466	0.495	0.426
l_R'	-0.687	-0.687*	-0.708	-0.708*
$\gamma_R(\beta_R < 0)$	0.367	0.326	0.397	0.365
$\gamma_R(\beta_R > 0)$	0.605	0.642	0.643	0.615

* Aynı değerler kullanılmıştır.

MMG, Abkowitz ve Blanke modellerinde, uzunluk L , lineer hızlar U , açısal hızlar U/L , kütle $(1/2)\rho L^2 d$, atalet momenti $(1/2)\rho L^4 d$, kuvvetler $(1/2)\rho L d U^2$ ve son olarak moment $(1/2)\rho L^2 d U^2$ ile boyutsuzlaştırılmıştır.

Sonuç olarak NMRI ve MOERI' ya ait deneysel verilerden yola çıkılarak MMG modelindeki ilgili parametreler ve hidrodinamik katsayılar hesap edildi. Yanal tekne kuvveti ve savrulma tekne momenti 2.derece ve 3. derece polinomla temsil edilerek iki farklı matematiksel model oluşturuldu. 3 serbestlik dereceli hareket denklemleri dönme testi ($\delta = \pm 35^\circ$) ve zigzag testi ($\delta = \pm 10^\circ$, $\delta = \pm 20^\circ$) için simüle edildi. Hem NMRI modeli hem de MOERI modeli için testler simüle edilirken aynı zamanda serbest testlerin yapıldığı $L=7$ m ve tam ölçek $L=320$ m büyüklüğündeki tekneler için de simülasyonlar yapıldı. Simülasyon boyunca başlangıç hızları NMRI $L=2.9091$ m modeli için 0.76 m/s, MOERI $L= 5.5172$ m modeli için 1.047 m/s, ortak olarak $L=7$ m teknesi için 1.179 m/s, $L=320$ m teknesi için 7.9738 m/s' dir. Ayrıca simülasyon boyunca pervane devir sayısı sabit tutulmuştur. Simülasyon sonuçları, karşılaştırma yapmak için boyutsuz biçimde verilmiştir.

KVLCC1 teknesi için Şekil 32,33,34'te Model 1, Şekil 35,36,37'de Model 2 uygulamalarının simülasyonları verilmiştir. KVLCC2 teknesi için ise Şekil 38,39,40'ta Model 1, Şekil 41,42,43'te Model 2 uygulamalarının simülasyonları verilmiştir.

KVLCC1 teknesi için Model 1 simülasyonlarını incelediğimizde, sancak için dönme manevrasında NMRI ait modeller içerisinde $L=2.9091$ m için elde ettiğimiz simülasyon yörünge açısından oldukça iyi sonuç vermektedir. Bu modelde tekne büyüklüğü arttıkça

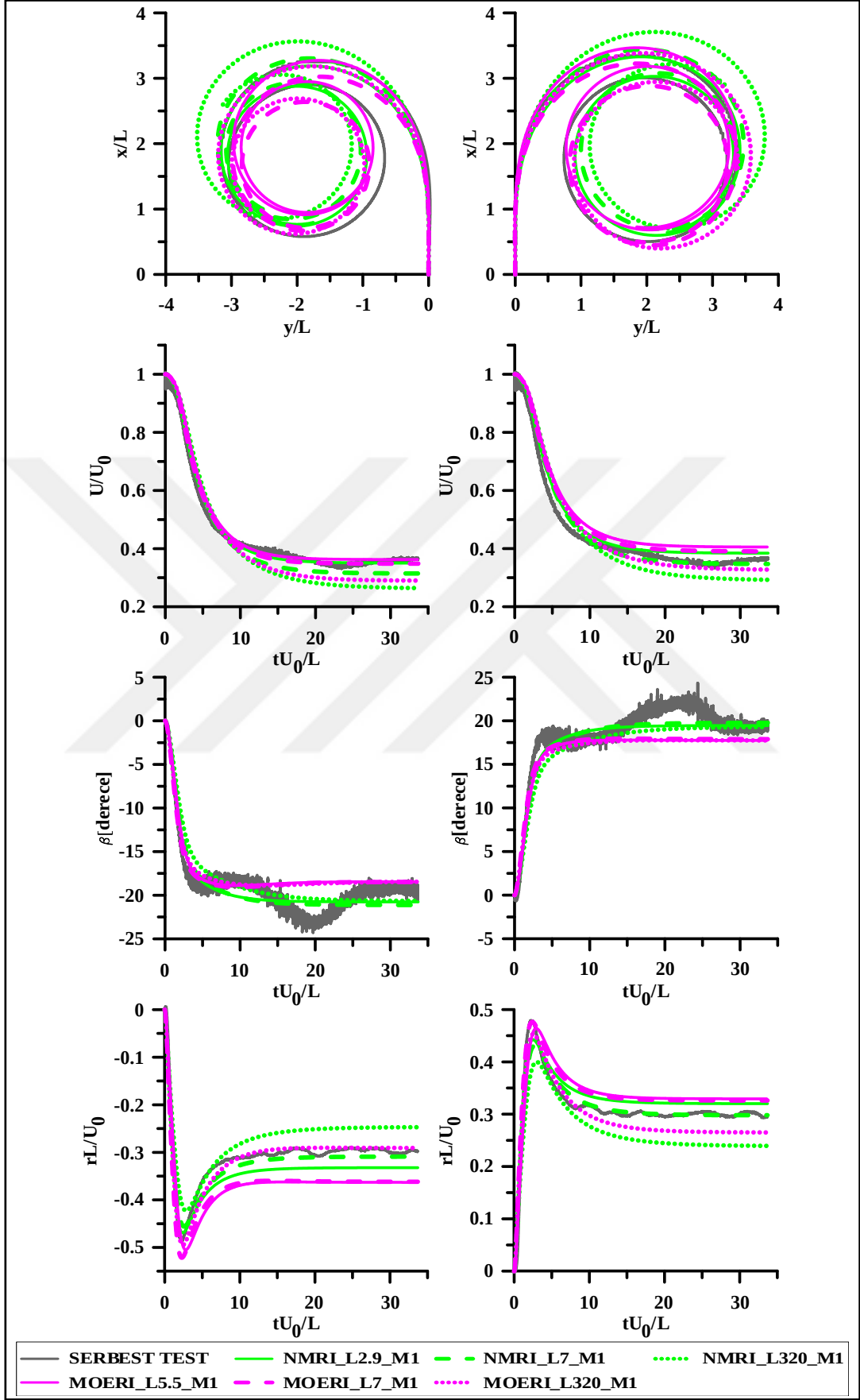
geminin takip ettiği yörünge serbest deney sonuçlarından uzaklaşmaktadır. MOERI'ye ait simülasyonlarda ise $L=5.5172$ m için elde ettiğimiz yörünge eğrisi diğer büyüklükteki tekneler için elde edilmiş yörünge eğrileriyle benzer bir hataya sahip olmaktadır. Benzer durum iskele için dönme manevrasında görülmektedir. $L=7$ m için iki farklı parametrelerle oluşturulmuş Model1'de hem sancak hem iskele için dönme manevrasında NMRI' ya ait olan modelde daha iyi sonuç elde edilmiştir. $L=320$ m için ise sancak ve iskele için dönme manevrasında MOERI' ya ait modelde uyumun iyi olduğu görülmektedir. Zigzag $\pm 10^\circ/\pm 10^\circ$ manevralarını incelediğimizde her üç farklı büyüklükteki tekne için gerçekleştirilmiş simülasyonlarda savrulma açısı NMRI'ya ait olan modelde daha iyi çıkmaktadır. Burada dönme manevralarında olduğu gibi $L=2.9091$ m için gerçekleştirilmiş simülasyon serbest deney verileri ile uyum göstermektedir. Zigzag $\pm 20^\circ/\pm 20^\circ$ manevralarını incelediğimizde ise zigzag $\pm 10^\circ/\pm 10^\circ$ manevralarına ait durumun burada da gerçekleştiğini görmekteyiz.

KVLCC1 teknesi için Model 2 simülasyonlarını incelediğimizde, sancak için dönme manevrasında NMRI ait modeller içerisinde Model 1'de olduğu gibi $L=2.9091$ m için elde ettiğimiz simülasyon yörünge açısından diğerlerine nazaran daha iyi sonuç vermektedir. Benzer durum iskele için dönme manevrasında da geçerlidir. MOERI'ya ait simülasyonları incelediğimizde ise hem sancak hem de iskele için dönme manevrasında $L=7$ m için yörünge eğrisi gerçek değerlere daha yakın çıkmaktadır. Zigzag $\pm 10^\circ/\pm 10^\circ$ manevralarını incelediğimizde MOERI'ya ait $L=7$ m için oluşturulmuş simülasyon savrulma açısı eğrisinin daha iyi olduğu görülmektedir. $L=320$ m için oluşturulmuş iki farklı savrulma açısı eğrisinde MOERI'ya ait olan için daha iyi sonuç verdiğini söyleyebiliriz. Zigzag $\pm 20^\circ/\pm 20^\circ$ manevralarını incelediğimizde deneylerin yapıldığı model büyüklüklerinde NMRI'ya ait olan savrulma açısı iyi çıkarken diğer büyüklükteki tekneler için MOERI'ya ait olan gerçek değerler daha yakındır.

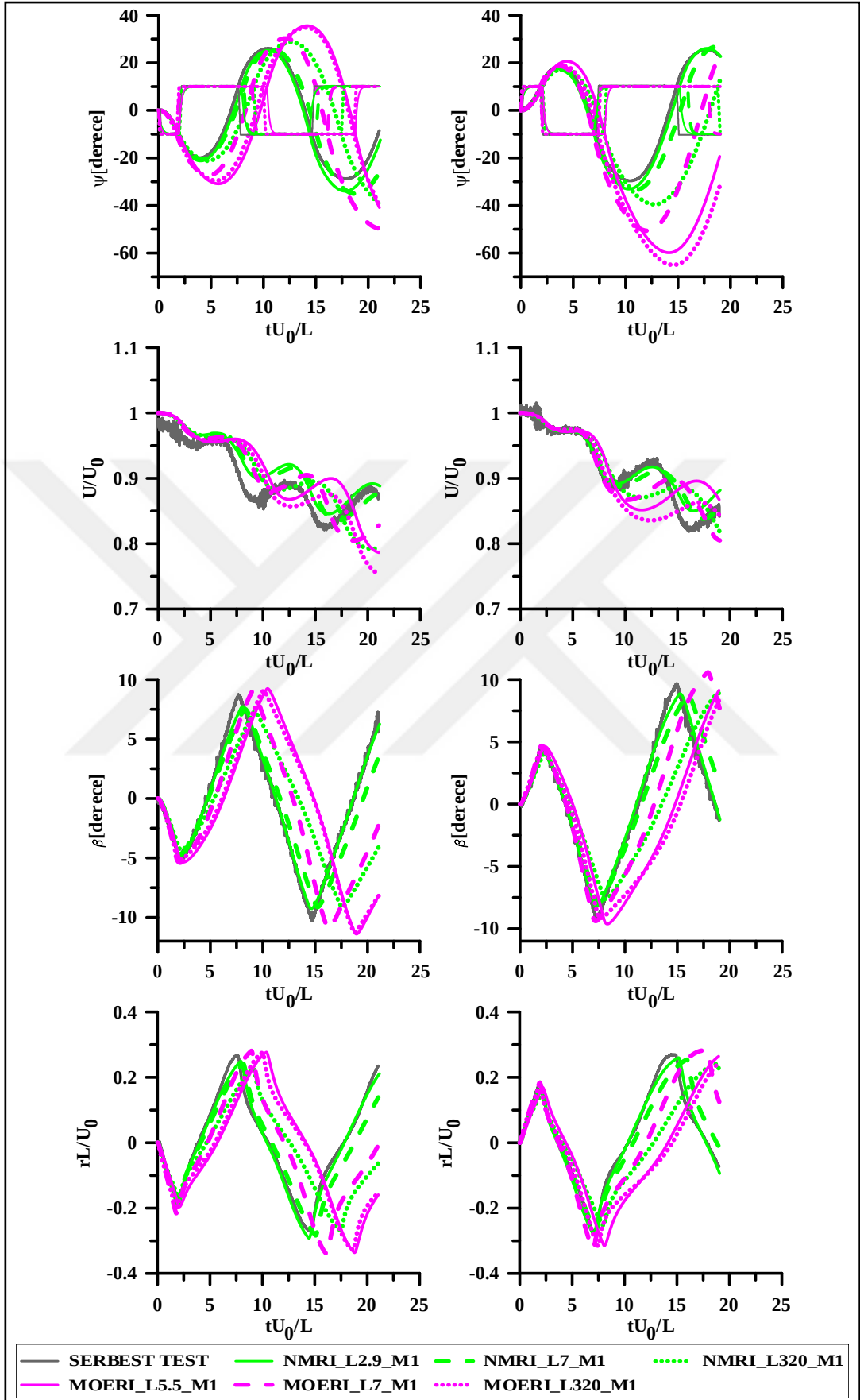
KVLCC2 teknesi için Model 1 simülasyonlarını incelediğimizde, hem sancak hem de iskele için dönme manevrasında NMRI' ya ait simülasyon KVLCC1 teknesinde olduğu gibi $L=2.9091$ m modeli gerçek değerlerle uyum göstermekle birlikte tam ölçekli modele gidildikçe gerçek değerlerden uzaklaşmaktadır. MOERI için sancak ve iskele dönmesi için inceleme yapıldığında üç farklı büyüklükteki tekne için gerçekleştirilmiş yörünge eğrilerinde benzerlik görülmektedir. Zigzag $\pm 10^\circ/\pm 10^\circ$ manevralarını incelediğimizde NMRI'ya ait olan için tekne büyüklükleri içerisinde $L=320$ m gerçek değerlerle uyum göstermektedir. MOERI için ise $L=7$ m için savrulma açısı diğer büyüklükte teknelere göre

daha iyi olduğu görülmektedir. Zigzag $\pm 20^\circ/\pm 20^\circ$ manevralarını incelediğimizde altı farklı simülasyon içerisinde NMRI ya ait olan $L=2.9091$ m için gerçekleştirilmiş simülasyon gerçek değerlerle çok iyi uyum göstermektedir. NMRI için tekne büyüklüğü arttıkça eğri gerçek değerlerden uzaklaşmaktadır. MOERI için ise $L=7$ m olan simülasyon parametresi savrulma açısı bakımından gerçek eğriye diğer büyüklükteki teknelere göre daha yakındır.

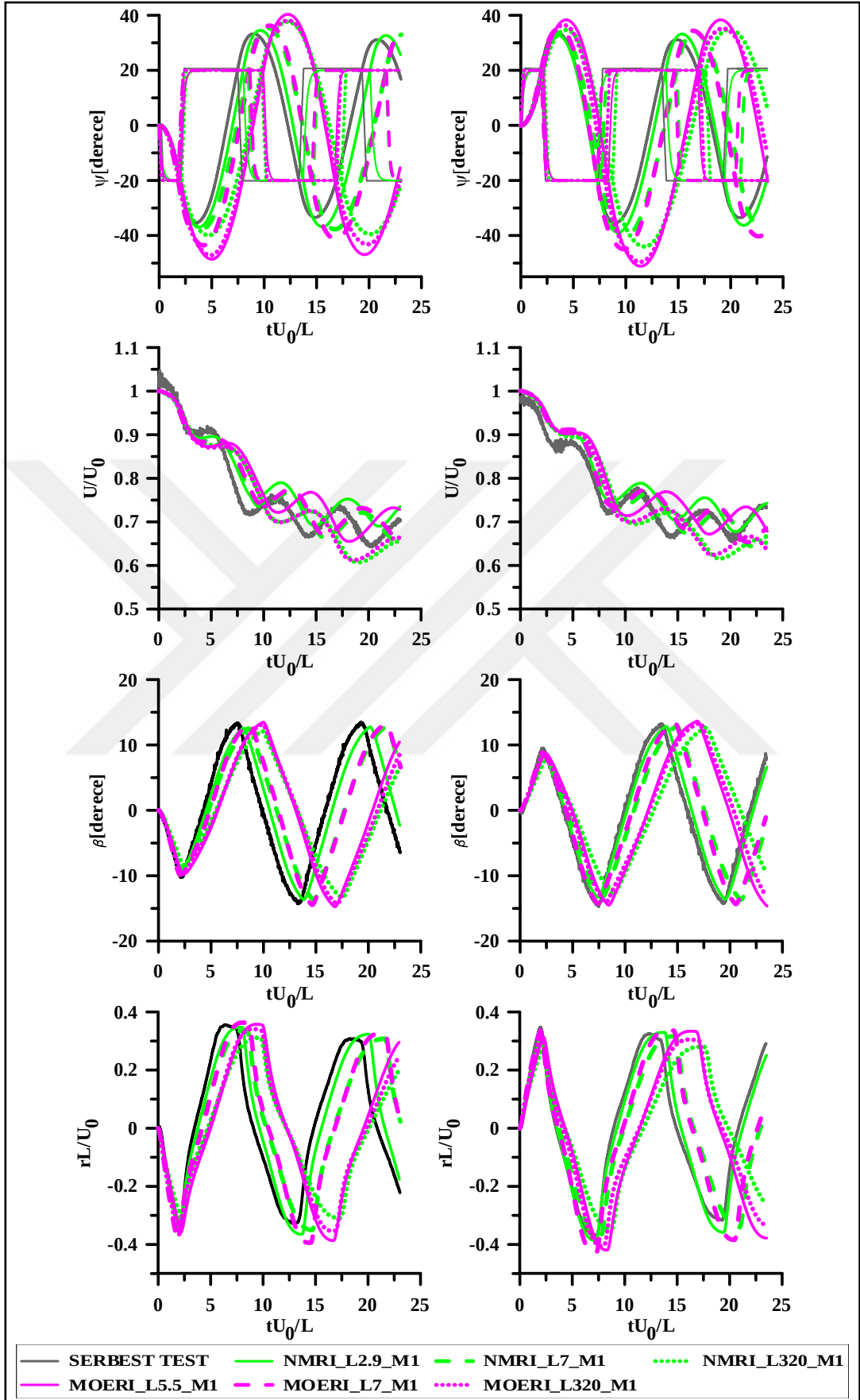
KVLCC2 teknesi için Model 2 simülasyonlarını incelediğimizde, sancak ve iskele dönme manevrasında NMRI' ya ait simülasyonlar içerisinde $L=2.9091$ m nin yörünge eğrisi gerçek değerlerle uyum göstermektedir ve tekne büyüklüğü arttıkça bu eğri gerçek egriden uzaklaşmaktadır. Aynı manevrada MOERI için gerçekleştirilmiş simülasyonların yörünge eğrileri gerçek değerlerin oldukça uzağındadır. Zigzag $\pm 10^\circ/\pm 10^\circ$ manevralarını incelediğimizde NMRI'ya ait $L=2.9091$ m ve $L=7$ m için simülasyon eğrisi uyum göstermekle birlikte tam ölçekli tekneler incelendiğinde MOERI'nın sonuçları daha uygundur. Zigzag $\pm 20^\circ/\pm 20^\circ$ manevralarında en iyi sonucun NMRI'ya ait $L=2.9091$ m için gerçekleştirilmiş simülasyon eğrilerinde olduğu, tekne büyüklüğüyle eğrinin gerçek değerlerden uzaklaştığını söyleyebiliriz. Ayrıca MOERI ya ait simlasyonlarda her üç farklı durumun benzerlik göstermesiyle birlikte en iyisi $L=7$ m için olan simülasyondur.



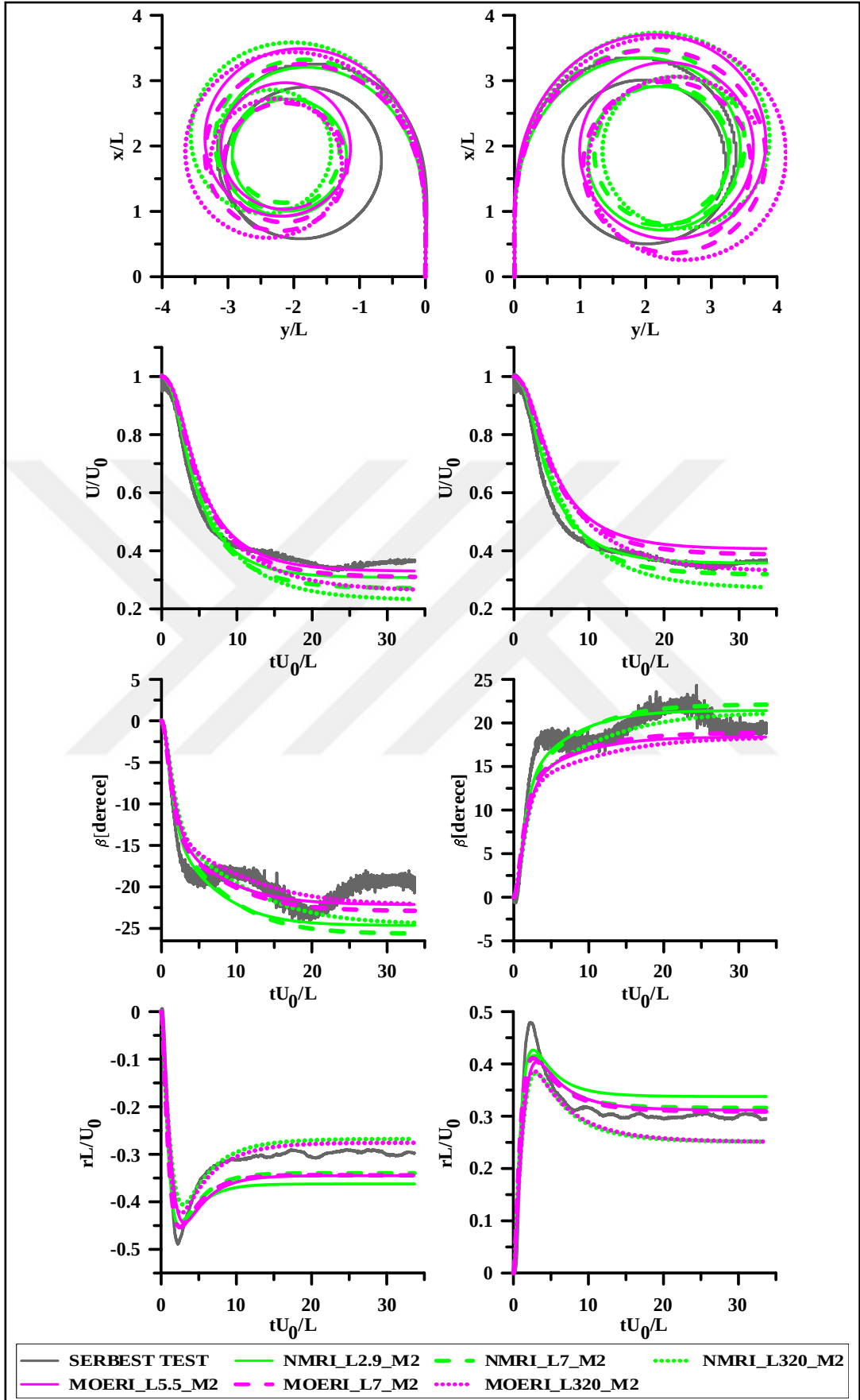
Şekil 32. Dönme manevraları-KVLCC1-MODEL 1 ($\delta = -35^\circ/35^\circ$)



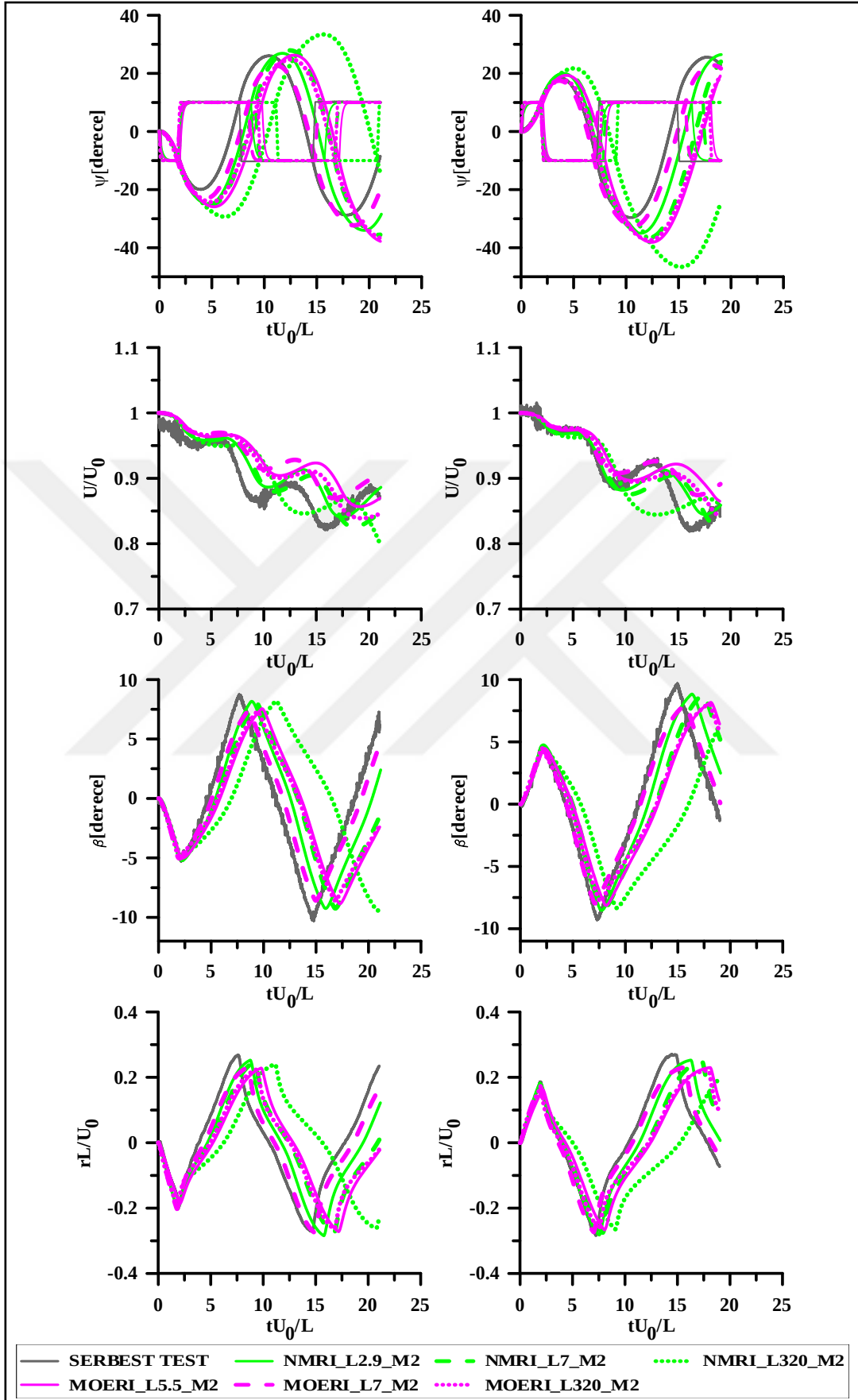
Şekil 33. Zigzag manevraları-KVLCC1-MODEL 1 ($\delta=-10^\circ/10^\circ$ & $10^\circ/-10^\circ$)



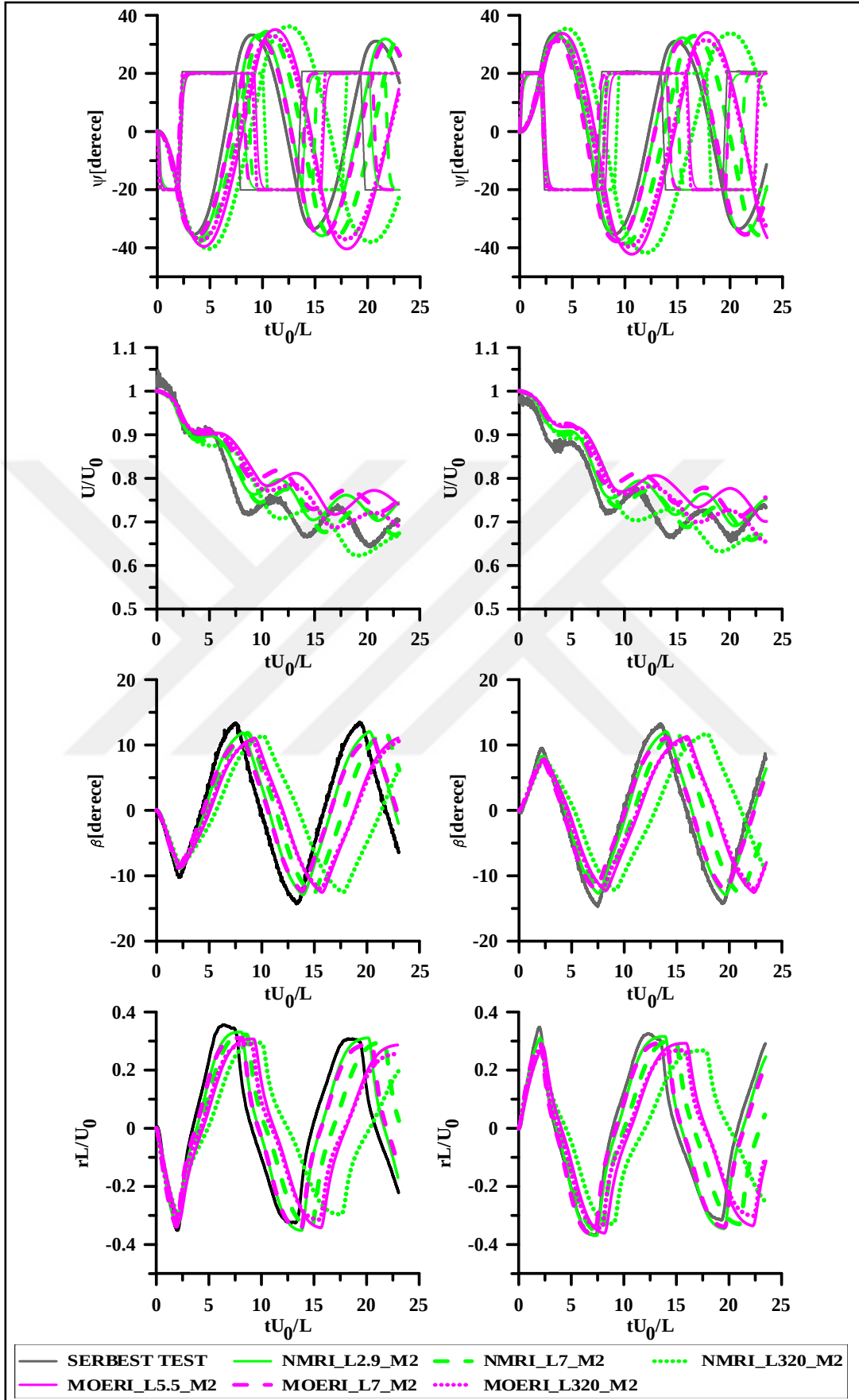
Şekil 34. Zigzag manevraları-KVLCC1-MODEL 1 ($\delta = -20^\circ/20^\circ$ & $20^\circ/-20^\circ$)



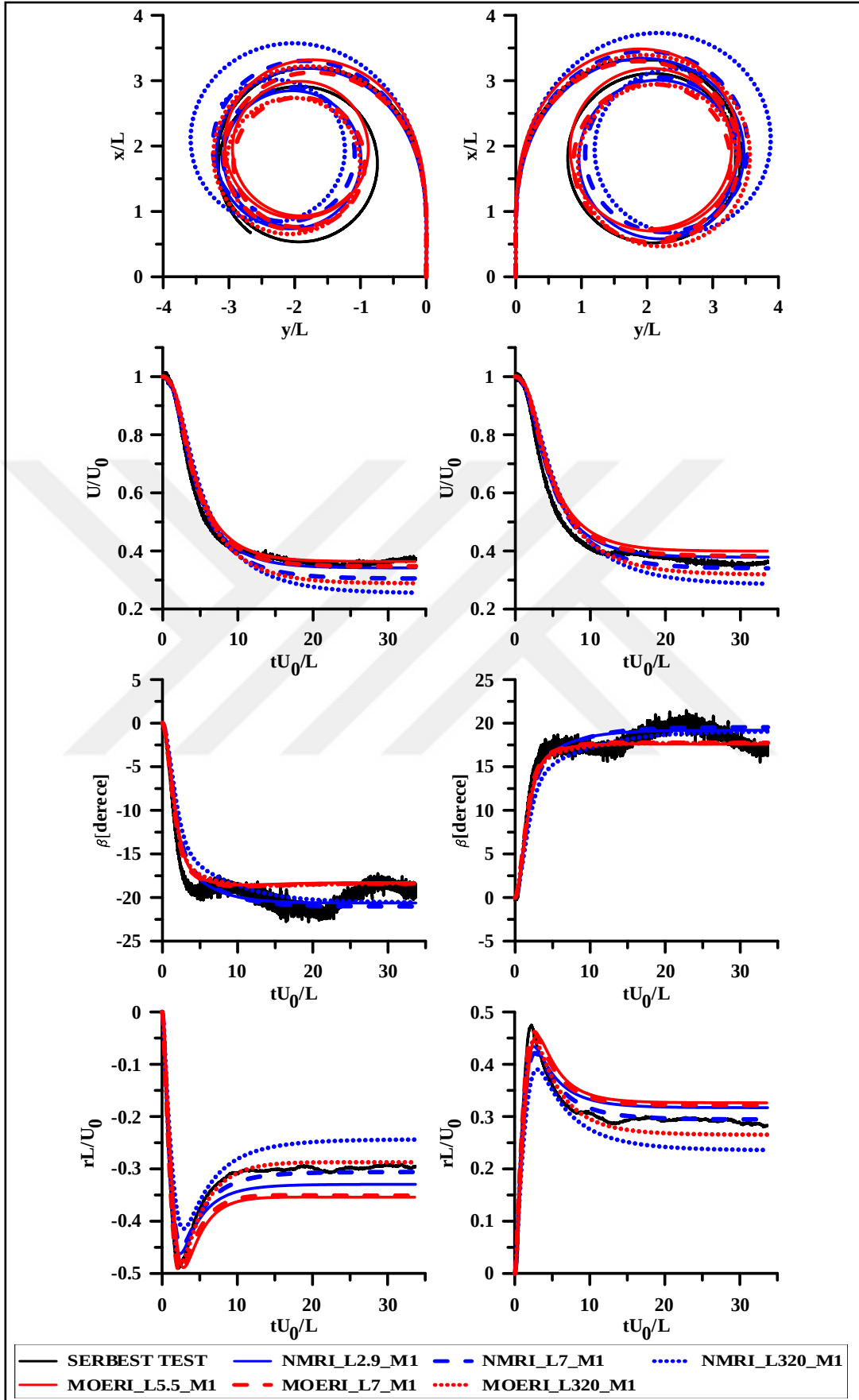
Şekil 35. Dönme manevraları-KVLCC1-MODEL 2 ($\delta=-35^\circ/35^\circ$)



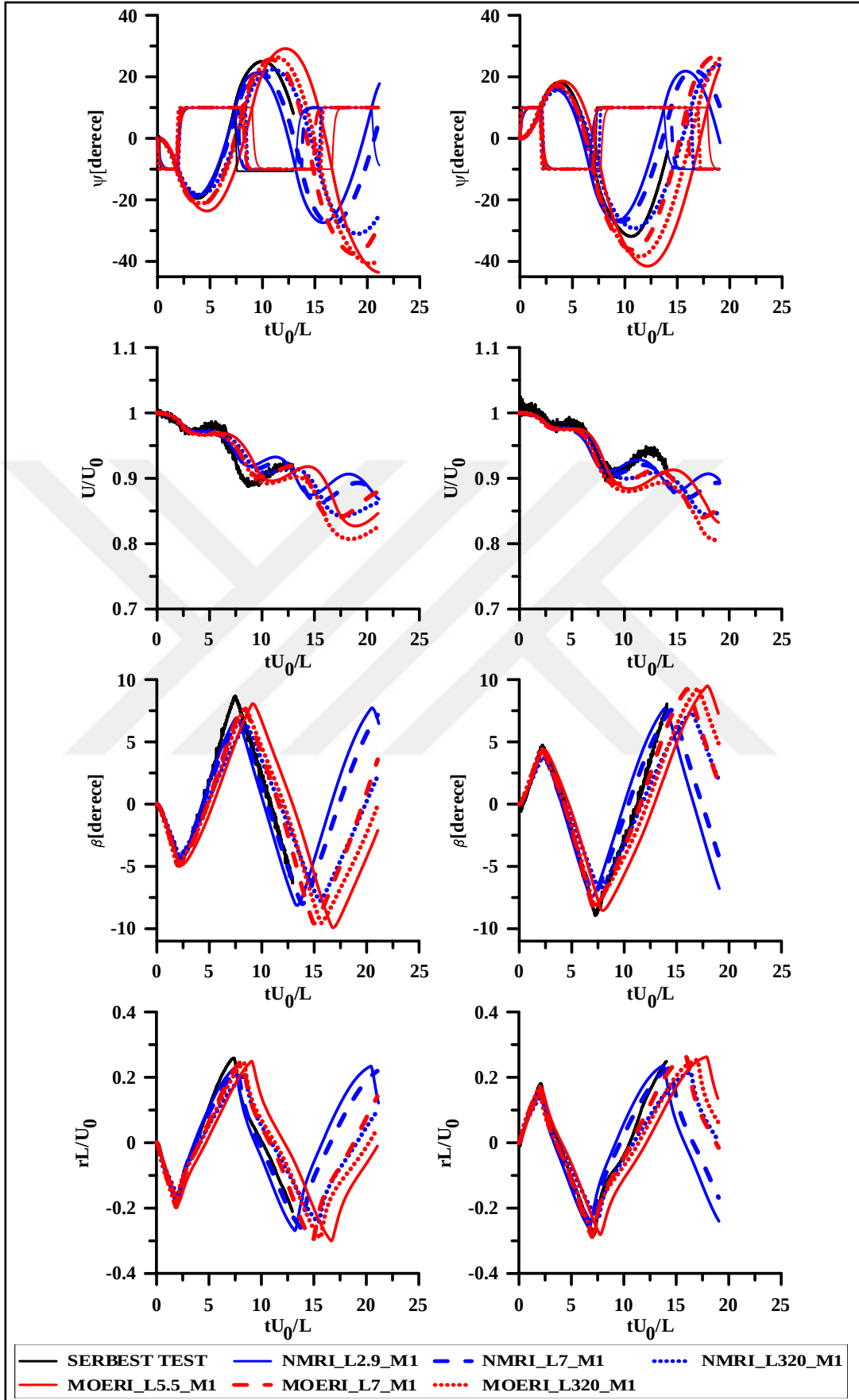
Şekil 36. Zigzag manevraları-KVLCC1-MODEL 2 ($\delta = -10^\circ/10^\circ$ & $10^\circ/-10^\circ$)



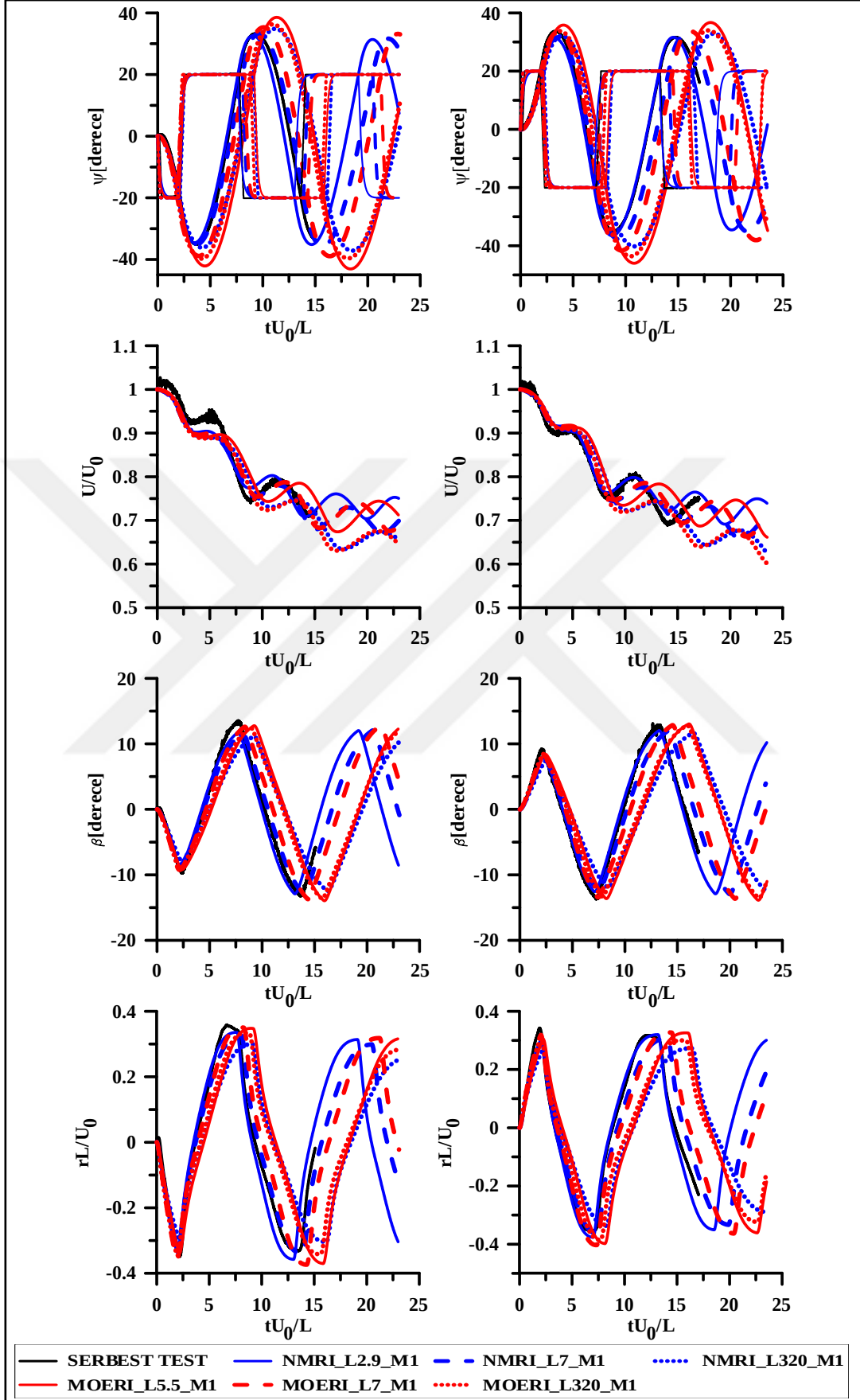
Şekil 37. Zigzag manevraları-KVLCC1-MODEL 2 ($\delta=-20^\circ/20^\circ&20^\circ/-20^\circ$)



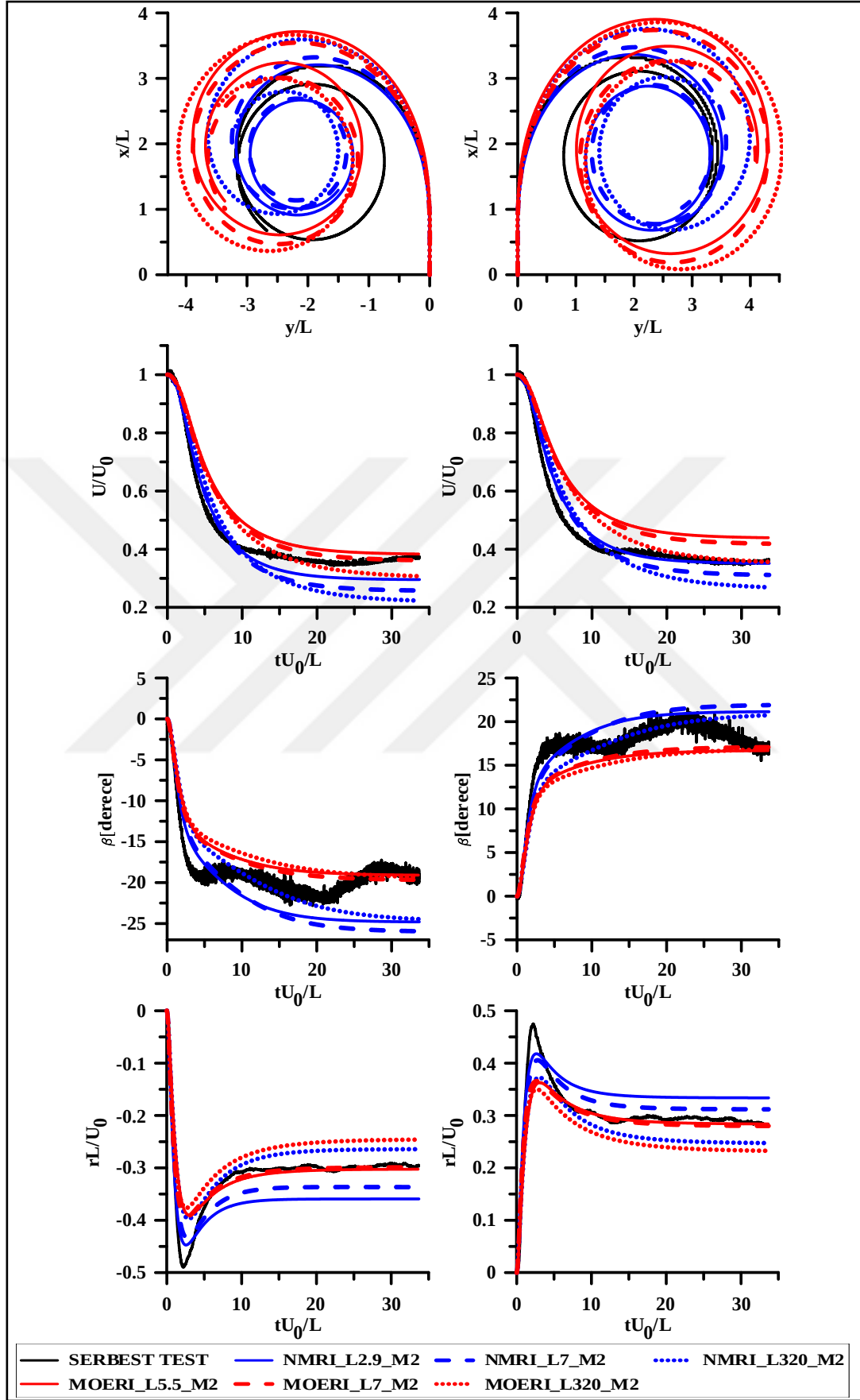
Şekil 38. Dönme manevraları-KVLCC2-MODEL 1 ($\delta = -35^\circ/35^\circ$)



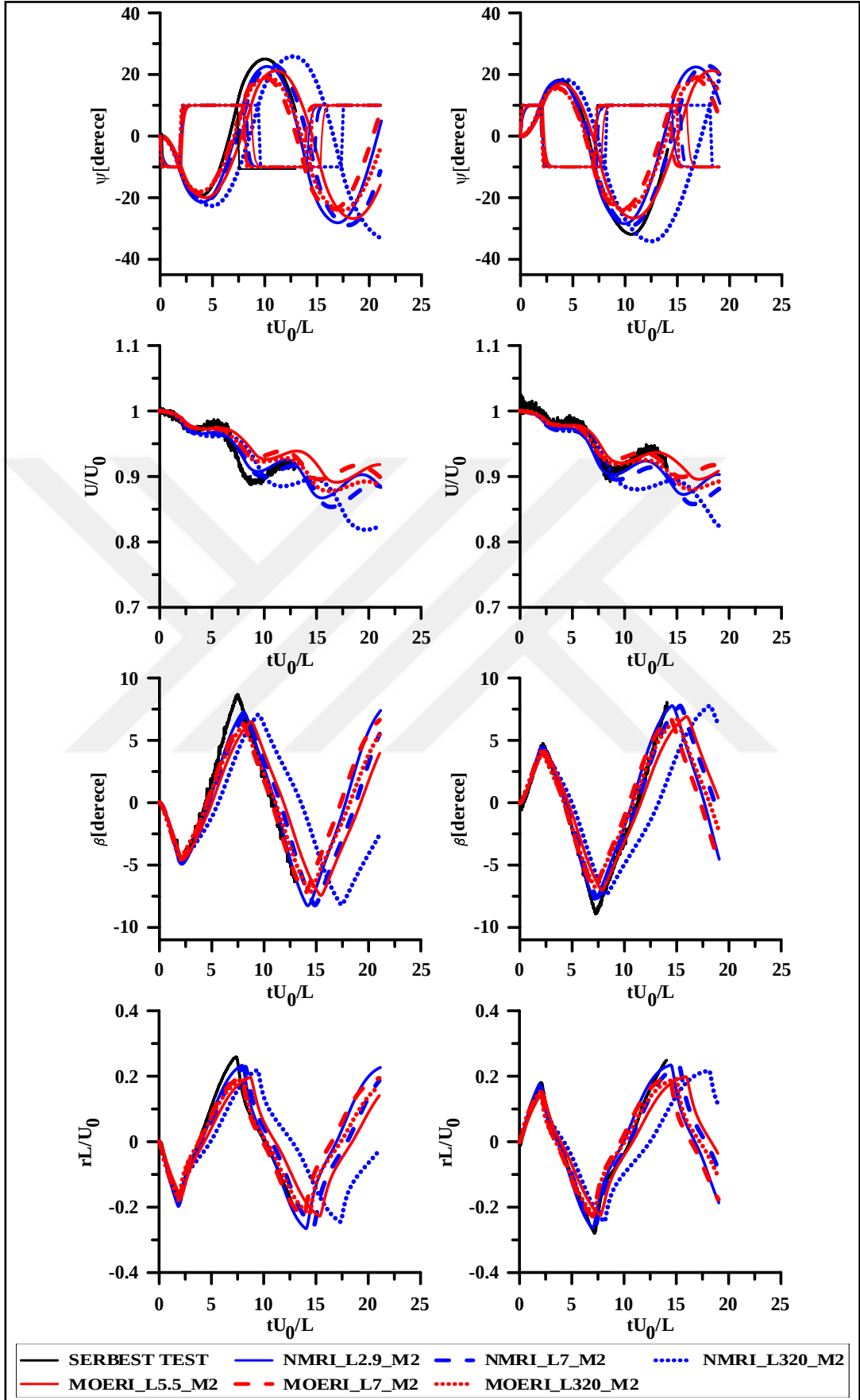
Şekil 39. Zigzag manevraları-KVLCC2-MODEL 1 ($\delta=-10^\circ/10^\circ$ & $10^\circ/-10^\circ$)



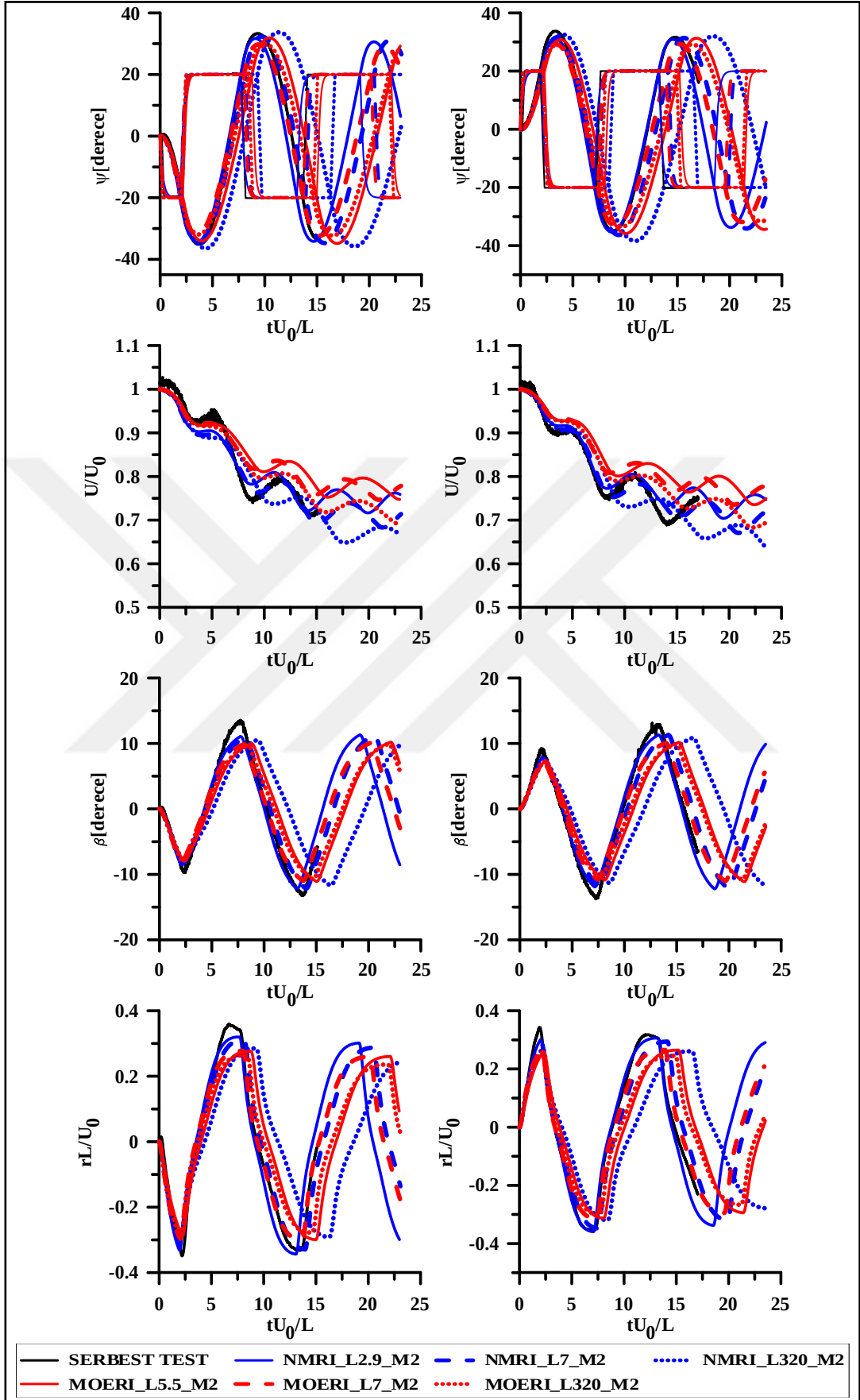
Şekil 40. Zigzag manevraları-KVLCC2-MODEL 1 ($\delta = -20^\circ/20^\circ$ & $20^\circ/-20^\circ$)



Şekil 41. Dönme manevraları-KVLCC2-MODEL 2 ($\delta=-35^\circ/35^\circ$)



Şekil 42. Zigzag manevraları-KVLCC2-MODEL 2 ($\delta=-10^\circ/10^\circ$ & $10^\circ/-10^\circ$)



Şekil 43. Zigzag manevraları-KVLCC2-MODEL 2 ($\delta=-20^\circ/20^\circ\&20^\circ/-20^\circ$)

KVLCC1 teknesi için Tablo 22,23'te Model 1'in, Tablo 24,25'te Model 2'nin, KVLCC2 teknesi için ise Tablo 26,27'de Model 1'in, Tablo 28,29'da Model 2'nin dönme manevra indeksleri olan ilerleme, transfer ve taktik çap ile zigzag manevraları indeksleri olan birinci ve ikinci aşırı dönme açısı verilmiştir.

Tablo 22. KVLCC1-MODEL 1 için dönme manevrası indeksleri

KVLCC1-MODEL 1								
Sim.	İndeks	Serbest Test	NMRI L2.9	NMRI L7	NMRI L320	MOERI L5.5	MOERI L7	MOERI L320
Dönme man. ($\delta=35^\circ$)	A_D'	3.28	3.26	3.37	3.64	3.40	3.15	3.31
	D_T'	3.28	3.34	3.40	3.72	3.29	3.30	3.51
	T_R'	1.30	1.43	1.46	1.61	1.38	1.37	1.46
Dönme man. ($\delta=-35^\circ$)	A_D'	3.19	3.11	3.23	3.49	3.20	2.95	3.11
	D_T'	3.07	3.08	3.13	3.45	2.91	2.92	3.13
	T_R'	1.17	1.32	1.35	1.49	1.22	1.21	1.30

Tablo 23. KVLCC1-MODEL 1 için zigzag manevrası indeksleri

KVLCC1-MODEL 1								
Sim.	İndeks (OSA)	Serbest Test	NMRI L2.9	NMRI L7	NMRI L320	MOERI L5.5	MOERI L7	MOERI L320
Zigzag man. ($10^\circ/-10^\circ$)	1 st	8.4	7.62	7.26	7.40	10.64	8.66	8.83
	2 nd	19.6	23.06	23.65	29.54	49.86	40.65	55.01
Zigzag man. ($-10^\circ/10^\circ$)	1 st	10	11.22	10.56	11.21	20.85	17.28	19.54
	2 nd	16.1	15.16	15.56	18.65	25.54	20.25	24.82
Zigzag man. ($20^\circ/-20^\circ$)	1 st	13.9	12.72	13.37	14.67	18.31	15.16	16.46
	2 nd	15.5	18.83	20.36	24.01	31.15	24.99	29.58
Zigzag man. ($-20^\circ/20^\circ$)	1 st	15.4	17.00	17.77	19.92	28.59	23.57	27.19
	2 nd	13.2	14.50	15.39	17.66	20.34	16.23	18.09

Tablo 24. KVLCC1-MODEL 2 için dönme manevrası indeksleri

KVLCC1-MODEL 2								
Sim.	İndeks	Serbest Test	NMRI L2.9	NMRI L7	NMRI L320	MOERI L5.5	MOERI L7	MOERI L320
Dönme man. ($\delta=35^\circ$)	A_D	3.28	3.28	3.39	3.67	3.64	3.41	3.60
	D_T	3.28	3.37	3.43	3.81	3.76	3.76	4.07
	T_R	1.30	1.48	1.51	1.69	1.63	1.62	1.76
Dönme man. ($\delta=-35^\circ$)	A_D	3.19	3.13	3.25	3.51	3.42	3.18	3.37
	D_T	3.07	3.06	3.12	3.49	3.28	3.27	3.58
	T_R	1.17	1.34	1.38	1.55	1.43	1.41	1.54

Tablo 25. KVLCC1-MODEL 2 için zigzag manevrası indeksleri

KVLCC1-MODEL 2								
Sim.	İndeks (OSA)	Serbest Test	NMRI L2.9	NMRI L7	NMRI L320	MOERI L5.5	MOERI L7	MOERI L320
Zigzag man. ($10^\circ/-10^\circ$)	1 st	8.4	9.99	9.97	11.72	9.33	7.48	7.68
	2 nd	19.6	24.98	26.61	36.58	28.10	22.59	27.42
Zigzag man. ($-10^\circ/10^\circ$)	1 st	10	12.99	15.03	19.31	15.89	13.06	14.28
	2 nd	16.1	16.89	17.89	23.40	16.25	12.75	14.83
Zigzag man. ($20^\circ/-20^\circ$)	1 st	13.9	12.94	13.62	15.40	13.77	11.26	11.75
	2 nd	15.5	17.42	15.59	21.73	22.20	17.73	19.59
Zigzag man. ($-20^\circ/20^\circ$)	1 st	15.4	16.73	17.54	20.36	19.56	15.96	17.35
	2 nd	13.2	13.36	14.19	16.18	15.08	11.89	12.88

Tablo 26. KVLCC2-MODEL 1 için dönme manevrası indeksleri

KVLCC2-MODEL 1								
Sim.	İndeks	Serbest Test	NMRI L2.9	NMRI L7	NMRI L320	MOERI L5.5	MOERI L7	MOERI L320
Dönme man. ($\delta=35^\circ$)	A_D	3.25	3.27	3.38	3.66	3.42	3.23	3.32
	D_T	3.34	3.40	3.46	3.81	3.33	3.34	3.50
	T_R	1.36	1.47	1.51	1.67	1.42	1.41	1.48
Dönme man. ($\delta=-35^\circ$)	A_D	3.11	3.12	3.23	3.50	3.25	3.06	3.15
	D_T	3.08	3.12	3.17	3.51	3.00	3.01	3.17
	T_R	1.22	1.35	1.38	1.53	1.28	1.27	1.33

Tablo 27. KVLCC2-MODEL 1 için zigzag manevrası indeksleri

KVLCC2-MODEL 1								
Sim.	İndeks (OSA)	Serbest Test	NMRI L2.9	NMRI L7	NMRI L320	MOERI L5.5	MOERI L7	MOERI L320
Zigzag man. ($10^\circ/10^\circ$)	1 st	8.2	6.27	6.02	5.77	8.61	7.28	6.79
	2 nd	21.9	16.81	17.00	19.23	31.53	26.23	28.38
Zigzag man. ($-10^\circ/10^\circ$)	1 st	9.5	8.98	8.46	8.40	13.61	11.66	11.17
	2 nd	15	11.20	11.26	12.38	19.17	15.60	16.35
Zigzag man. ($20^\circ/20^\circ$)	1 st	13.7	11.15	11.60	12.09	15.82	13.43	13.76
	2 nd	14.9	16.53	17.72	20.20	25.99	21.60	23.59
Zigzag man. ($-20^\circ/20^\circ$)	1 st	15.1	14.57	15.09	16.18	22.11	18.86	19.73
	2 nd	13.3	12.61	13.35	14.85	18.55	15.31	16.29

Tablo 28. KVLCC2-MODEL 2 için dönme manevrası indeksleri

KVLCC2-MODEL 2								
Sim.	İndeks	Serbest Test	NMRI L2.9	NMRI L7	NMRI L320	MOERI L5.5	MOERI L7	MOERI L320
Dönme man. ($\delta=35^\circ$)	A_D	3.25	3.30	3.41	3.69	3.84	3.68	3.80
	D_T	3.34	3.44	3.51	3.92	4.24	4.24	4.48
	T_R	1.36	1.52	1.56	1.75	1.86	1.85	1.96
Dönme man. ($\delta=-35^\circ$)	A_D	3.11	3.14	3.25	3.53	3.65	3.48	3.60
	D_T	3.08	3.10	3.17	3.57	3.82	3.82	4.06
	T_R	1.22	1.38	1.42	1.60	1.67	1.67	1.77

Tablo 29. KVLCC2-MODEL 2 için zigzag manevrası indeksleri

KVLCC2-MODEL 2								
Sim.	İndeks (OSA)	Serbest Test	NMRI L2.9	NMRI L7	NMRI L320	MOERI L5.5	MOERI L7	MOERI L320
Zigzag man. ($10^\circ/10^\circ$)	1 st	8.2	7.94	7.69	8.31	7.00	5.74	5.39
	2 nd	21.9	18.40	19.14	24.13	16.63	13.76	14.03
Zigzag man. ($-10^\circ/10^\circ$)	1 st	9.5	11.44	11.14	12.65	9.98	8.37	7.99
	2 nd	15	12.60	13.03	15.86	11.22	9.03	9.10
Zigzag man. ($20^\circ/20^\circ$)	1 st	13.7	10.96	11.67	12.54	10.81	9.20	9.08
	2 nd	14.9	15.39	16.30	18.36	15.81	13.09	13.52
Zigzag man. ($-20^\circ/20^\circ$)	1 st	15.1	14.33	14.85	16.44	14.04	11.78	11.90
	2 nd	13.3	11.68	12.33	13.69	11.90	9.75	9.96

2.2.4. Abkowitz Modeli Uygulaması

Abkowitz modeli hareket denkleminin sağ tarafında yer alan kuvvet ve moment büyüklüklerinin Taylor serisi yardımıyla teknenin hız ve ivme büyüklükleri ve dümen açısı cinsinden yazılması esasına dayanır. Bu açıdan teknenin boyuna kuvvet, yanal kuvvet ve savrulma momenti aşağıdaki gibi modellenmiştir:

X doğrultusundaki toplam kuvvet aşağıdaki yazılabilir:

$$\begin{aligned} X = & X_u \Delta U + X_{\dot{u}} \dot{u} + X_{uu} \Delta U^2 + X_v v + X_{vv} v^2 + X_{vvv} v^3 + X_{vvvv} v^4 \\ & + X_{rr} r^2 + X_{\delta\delta} \delta^2 + X_{vr} vr + X_{v\delta} v\delta + X_{r\delta} r\delta + X_{uuu} \Delta U^3 \end{aligned} \quad (255)$$

Toplam yanal kuvvet ve toplam savrulma momenti yanal hız, savrulma hızı ve dümen açısının gerçek ve mutlak değerleri cinsinden iki farklı şekilde yazılması suretiyle aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

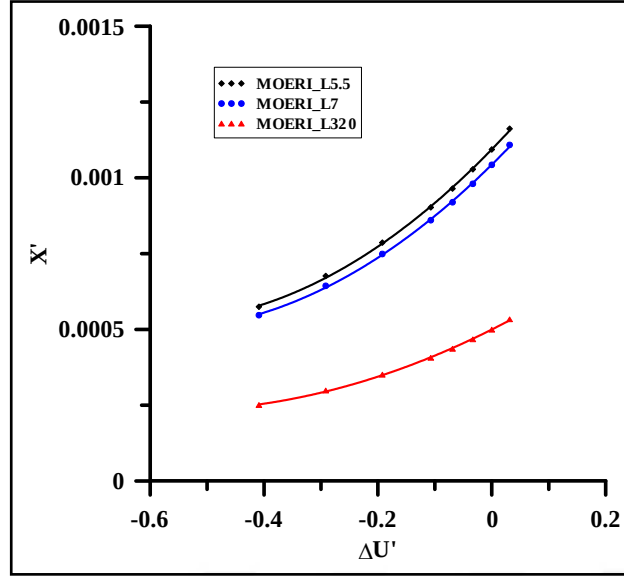
Model 3:

$$\begin{aligned} Y = & Y^0 + Y_u^0 \Delta U + Y_v v + Y_r r + Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{\dot{r}} \dot{r} + Y_{\delta} \delta \\ & + Y_{uv} \Delta U v + Y_{ur} \Delta U r + Y_{u\delta} \Delta U \delta + Y_{vvv} v^3 + Y_{rrr} r^3 + Y_{\delta\delta\delta} \delta^3 \\ & + Y_{vvr} v^2 r + Y_{vv\delta} v^2 \delta + Y_{vrr} vr^2 + Y_{v\delta\delta} v\delta^2 + Y_{r\delta\delta} r\delta^2 + Y_{rr\delta} r^2 \delta \\ N = & N^0 + N_u^0 \Delta U + N_v v + N_r r + N_{\dot{v}} \dot{v} + N_{\dot{r}} \dot{r} + N_{\delta} \delta \\ & + N_{uv} \Delta U v + N_{ur} \Delta U r + N_{u\delta} \Delta U \delta + N_{vvv} v^3 + N_{rrr} r^3 + N_{\delta\delta\delta} \delta^3 \\ & + N_{vvr} v^2 r + N_{vv\delta} v^2 \delta + N_{vrr} vr^2 + N_{v\delta\delta} v\delta^2 + N_{r\delta\delta} r\delta^2 + N_{rr\delta} r^2 \delta \end{aligned} \quad (256)$$

Model 4:

$$\begin{aligned} Y = & Y^0 + Y_u^0 \Delta U + Y_v v + Y_r r + Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{\dot{r}} \dot{r} + Y_{\delta} \delta \\ & + Y_{uv} \Delta U v + Y_{ur} \Delta U r + Y_{u\delta} \Delta U \delta + Y_{|v|v} |v|v + Y_{|r|r} |r|r + Y_{|\delta|\delta} |\delta|\delta \\ & + Y_{|v|r} |v|r + Y_{|r|v} |r|v + Y_{|v|\delta} |v|\delta + Y_{|\delta|v} |\delta|v + Y_{|r|\delta} |r|\delta + Y_{|\delta|r} |\delta|r \\ N = & N^0 + N_u^0 \Delta U + N_v v + N_r r + N_{\dot{v}} \dot{v} + N_{\dot{r}} \dot{r} + N_{\delta} \delta \\ & + N_{uv} \Delta U v + N_{ur} \Delta U r + N_{u\delta} \Delta U \delta + N_{|v|v} |v|v + N_{|r|r} |r|r + N_{|\delta|\delta} |\delta|\delta \\ & + N_{|v|r} |v|r + N_{|r|v} |r|v + N_{|v|\delta} |v|\delta + N_{|\delta|v} |\delta|v + N_{|r|\delta} |r|\delta + N_{|\delta|r} |\delta|r \end{aligned} \quad (257)$$

X_u', X_{uu}', X_{uuu}' terimleri model için direnç deneyindeki verilere uydurulan eğriyi temsil eden polinomun katsayılarına karşılık gelmektedir. $L=7$ m ve $L=320$ m büyüklüğündeki tekneler için ise Hughes yönteminden faydalanarak elde edilmiş direnç değerlerine eğri uydurulmasıyla hesap edilmiştir. Şekil 44'te elde edilmiş direnç değerlerine uydurulan eğriler gösterilmektedir. Ayrıca Tablo 30'da bu uydurulan eğriyi temsil eden polinomun katsayıları verilmektedir.



Şekil 44. Teknelerin direnç değerleri (MOERI-KVLCC1)

Tablo 30. KVLCC1 ve KVLCC2 teknelerinin direnç kuvveti ile ilgili hidrodinamik katsayıları

		NMRI				MOERI	
	Lpp (m)	2.9091	7.0000	320	5.5172	7.0000	320
KVLCC1	X_u'	-0.0390	-0.0316	-0.0154	-0.0313	-0.0299	-0.0150
	X_{uu}'	-0.0931	-0.0832	-0.0606	-0.0407	-0.0390	-0.0204
	X_{uuu}'	-0.2083	-0.1998	-0.1782	-0.0282	-0.0270	-0.0144
KVLCC2	X_u'	-0.0430	-0.0356	-0.0194	-0.0317	-0.0303	-0.0156
	X_{uu}'	-0.1124	-0.1025	-0.0802	-0.0420	-0.0403	-0.0219
	X_{uuu}'	-0.2075	-0.1988	-0.1785	-0.0301	-0.0289	-0.0164

Atalet kuvvetiyle ilgili terimler NMRI'ya ait deneysel verilerden ivme değişimi olmadığından hesap edilmesi mümkün değildir. MOERI'ya ait verilerden bu terimlerin elde edilmesi mümkündür. Bu sebepten dolayı terimleri MOERI'ya ait yalnızca yanal öteleme testinden elde edilen Y_v' , N_v' terimleri ve yalnızca savrulma testinden elde edilen Y_r' , N_r' terimleri NMRI'ya ait model için de kullanılmıştır. Fakat X_u' terimi için deneysel veri olmadığından ampirik bağıntıyla hesap edilmiştir. Tablo 31'de atalet terimlerinin değerleri verilmiştir.

Tablo 31. KVLCC1 ve KVLCC2 tekneleri için atalet ile ilgili hidrodinamik katsayılar

	KVLCC1		KVLCC2	
	NMRI (CMT)	MOERI (PMM)	NMRI (CMT)	MOERI (PMM)
$X_{\dot{u}}'$	0.0369	0.0369	-0.0368	-0.0368
$Y_{\dot{v}}'$	-0.2318*	-0.2318	-0.2323*	-0.2323
$Y_{\dot{r}}'$	-0.0254*	-0.0254	-0.0222*	-0.0222
$N_{\dot{v}}'$	-0.0140*	-0.0140	-0.0123*	-0.0123
$N_{\dot{r}}'$	-0.0091*	-0.0091	-0.0090*	-0.0090

* Aynı değerler kullanılmıştır.

Boyuna ve yanal kuvvet ile savrulma momentine ait hidrodinamik katsayılar farklı türde deneysel verilere eğri uydurma yardımıyla hesap edilmiştir. Tablo 32’de bu hidrodinamik katsayıların elde edildiği deney tipleri görülmektedir. X doğrultusundaki kuvvet büyüklüğüne ait KVLCC1 ve KVLCC2 tekneleri için hidrodinamik katsayılar Tablo 33’te Y yanal kuvveti ve N savrulma momentine ait hidrodinamik katsayılar ise KVLCC1 için Tablo 34,35 KVLCC2 için Tablo 36,37’de verilmektedir.

Tablo 32. Hidrodinamik katsayıların elde edildiği deney türleri

Deney Tipi	Hidrodinamik Katsayılar
Hücum açısı testi	$X_v', X_{vv}', X_{vvv}', X_{vvvv}'$ $Y^{0'}, Y_v', Y_{vv}', Y_{ v v}', N^{0'}, N_v', N_{vv}', N_{ v v}'$ $Y_u^{0'}, Y_{uv}', N_u^{0'}, N_{uv}'$
Yalnızca savrulma testi	$X_{rr}', Y_r', Y_{rr}', Y_{ r r}', N_r', N_{rr}', N_{ r r}', Y_{ur}', N_{ur}'$
Dümen testi	$X_{\delta\delta}', Y_{\delta}', Y_{\delta\delta\delta}', Y_{ \delta \delta}', N_{\delta}', N_{\delta\delta\delta}', N_{ \delta \delta}', Y_{u\delta}', N_{u\delta}'$
Savrulma-dümen testi	$Y_{vvr}', Y_{vrr}', Y_{ v r}', Y_{ r v}', N_{vvr}', N_{vrr}', N_{ v r}', N_{ r v}'$
Hücum açısı-dümen testi	$X_{v\delta}', Y_{vv\delta}', Y_{v\delta\delta}', Y_{ v \delta}', Y_{ \delta v}', N_{vv\delta}', N_{v\delta\delta}', N_{ v \delta}', N_{ \delta v}'$
Savrulma-dümen testi	$X_{r\delta}', Y_{rr\delta}', Y_{rr\delta}', Y_{ r \delta}', Y_{ \delta r}', N_{rr\delta}', N_{rr\delta}', N_{ r \delta}', N_{ \delta r}'$

Tablo 33. KVLCC1 ve KVLCC2 tekneleri için X kuvveti ile ilgili hidrodinamik katsayılar

	KVLCC1		KVLCC2	
	NMRI (CMT)	MOERI (PMM)	NMRI (CMT)	MOERI (PMM)
X_v'	0.0065	0.0039	0.0094	0.0047
X_{vv}'	-0.0484	-0.0199	-0.0606	-0.0711
X_{vvv}'	-0.0787	-0.0049	-0.0904	-0.0186
X_{vvvv}'	0.7516	0.3812	0.7612	0.8372
X_{rr}'	0.0131	0.0209	0.0072	0.0189
$X_{\delta\delta}'$	-0.0357	-0.0177	-0.0343	-0.0191
X_{vr}'	0.2244	0.1941	0.2299	0.2125
$X_{v\delta}'$	0.0307	0.0307*	0.0238	0.0277
$X_{r\delta}'$	-0.0163	-0.0163*	-0.0136	-0.0136*

* Aynı değerler kullanılmıştır.

Tablo 34. KVLCC1 teknesi için Y kuvveti ile ilgili hidrodinamik katsayılar

	NMRI (CMT)	MOERI (PMM)		NMRI (CMT)	MOERI (PMM)
$Y^{0'}$	0.0030	-0.0001	$Y^{0'}$	0.0030	-0.0001
Y_v'	-0.3287	-0.3072	Y_v'	-0.2466	-0.2294
Y_{vv}'	-1.6170	-1.0988	$Y_{ v v}'$	-0.7777	-0.6243
Y_r'	0.0722	0.0754	Y_r'	0.0623	0.0811
Y_{rr}'	0.0333	0.0307	$Y_{ r r}'$	0.0372	0.0265
Y_δ'	0.0635	0.0416	Y_δ'	0.0639	0.0401
$Y_{\delta\delta}'$	-0.0093	0.0066	$Y_{ \delta \delta}'$	-0.0056	0.0067
Y_{vr}'	0.4664	0.3617	$Y_{ v r}'$	0.0987	0.0987*
Y_{vr}'	-0.3911	-0.3937	$Y_{ r v}'$	-0.3076	-0.3076*
$Y_{v\delta}'$	0.1064	0.1064*	$Y_{ v \delta}'$	0.0209	0.0184
$Y_{v\delta}'$	-0.0165	-0.0165*	$Y_{ \delta v}'$	0.0085	0.1038
$Y_u^{0'}$	0.0026*	0.0026	$Y_u^{0'}$	0.0026*	0.0026
Y_{uv}'	0.0462*	0.0462	Y_{uv}'	0.0462*	0.0462
Y_{ur}'	-0.0391*	-0.0391	Y_{ur}'	-0.0391*	-0.0391
$Y_{u\delta}'$	-0.0638*	-0.0638	$Y_{u\delta}'$	-0.0638*	-0.0638
$Y_{r\delta\delta}'$	-0.0980	-0.0980*	$Y_{ r \delta}'$	0.1254	0.1254*
$Y_{r\delta\delta}'$	0.1627	0.1627*	$Y_{ \delta r}'$	-0.0881	-0.0881*

* Aynı değerler kullanılmıştır.

Tablo 35. KVLCC1 teknesi için N momenti ile ilgili hidrodinamik katsayılar

	NMRI (CMT)	MOERI (PMM)		NMRI (CMT)	MOERI (PMM)
$N^{0'}$	0.0003	0.0008	$N^{0'}$	0.0003	0.0008
N_v'	-0.1275	-0.1256	N_v'	-0.1292	-0.1318
N_{vv}'	0.0211	0.0684	$N_{ v v}'$	0.0124	0.0433
N_r'	-0.0592	-0.0579	N_r'	-0.0558	-0.0578
N_{rr}'	-0.0136	0.0006	$N_{ r r}'$	-0.0149	0.0045
N_δ'	-0.0306	-0.0193	N_δ'	-0.0311	-0.0183
$N_{\delta\delta}'$	0.0072	-0.0039	$N_{ \delta \delta}'$	0.0047	-0.0043
N_{vr}'	-0.3188	-0.2489	$N_{ v r}'$	-0.0757	-0.0757*
N_{rr}'	0.0653	0.0068	$N_{ r v}'$	0.0604	0.0604*
$N_{v\delta}'$	-0.0196	-0.0196*	$N_{ v \delta}'$	-0.0074	-0.0230
$N_{v\delta\delta}'$	-0.0009	-0.0009*	$N_{ \delta v}'$	-0.0015	-0.0100
$N_u^{0'}$	-0.0005*	-0.0005	$N_u^{0'}$	-0.0005*	-0.0005
N_{uv}'	-0.0137*	-0.0137	N_{uv}'	-0.0137*	-0.0137
N_{ur}'	-0.0053*	-0.0053	N_{ur}'	-0.0053*	-0.0053
$N_{u\delta}'$	0.0285*	0.0285	$N_{u\delta}'$	0.0285*	0.0285
$N_{r\delta\delta}'$	0.0033	0.0033*	$N_{ r \delta}'$	-0.0117	-0.0117*
$N_{rr\delta}'$	-0.0083	-0.0083*	$N_{ \delta r}'$	0.0028	0.0028*

* Aynı değerler kullanılmıştır.

Tablo 36. KVLCC2 teknesi için Y kuvveti ile ilgili hidrodinamik katsayılar

	NMRI (CMT)	MOERI (PMM)		NMRI (CMT)	MOERI (PMM)
$Y^{0'}$	0.0009	-0.0010	$Y^{0'}$	0.0009	-0.0010
Y_v'	-0.3308	-0.2948	Y_v'	-0.2479	-0.2235
Y_{vv}'	-1.8060	-1.3988	$Y_{ v v}'$	-0.8263	-0.6751
Y_r'	0.0882	0.0883	Y_r'	0.0867	0.0963
Y_{rr}'	0.0112	0.0325	$Y_{ r r}'$	0.0103	0.0206
Y_δ'	0.0640	0.0427	Y_δ'	0.0636	0.0412
$Y_{\delta\delta}'$	-0.0088	0.0035	$Y_{ \delta \delta}'$	-0.0040	0.0053
Y_{vr}'	0.4519	0.3442	$Y_{ v r}'$	0.0891	0.0891*
Y_{vr}'	-0.4044	-0.3809	$Y_{ r v}'$	-0.3232	-0.3232*
$Y_{v\delta}'$	-0.0061	-0.0061*	$Y_{ v \delta}'$	-0.0166	0.0204
$Y_{v\delta}'$	-0.0201	-0.0201*	$Y_{ \delta v}'$	0.0095	0.0284
$Y_u^{0'}$	0.0033*	0.0033	$Y_u^{0'}$	0.0033*	0.0033
Y_{uv}'	0.0246*	0.0246	Y_{uv}'	0.0246*	0.0246
Y_{ur}'	-0.0444*	-0.0444	Y_{ur}'	-0.0444*	-0.0444
$Y_{u\delta}'$	-0.0600*	-0.0600	$Y_{u\delta}'$	-0.0600*	-0.0600
$Y_{r\delta\delta}'$	-0.0117	-0.0117*	$Y_{ r \delta}'$	0.0115	0.0115*
$Y_{r\delta}'$	0.0099	0.0099*	$Y_{ \delta r}'$	-0.0046	-0.0046*

* Aynı değerler kullanılmıştır.

Tablo 37. KVLCC2 teknesi için N momenti ile ilgili hidrodinamik katsayılar

	NMRI (CMT)	MOERI (PMM)		NMRI (CMT)	MOERI (PMM)
$N^{0'}$	0.0002	0.0006	$N^{0'}$	0.0002	0.0006
N_v'	-0.1297	-0.1196	N_v'	-0.1330	-0.1238
N_{vv}'	0.0699	0.0732	$N_{ v v}'$	0.0321	0.0372
N_r'	-0.0590	-0.0574	N_r'	-0.0557	-0.0582
N_{rr}'	-0.0129	-0.0030	$N_{ r r}'$	-0.0140	0.0028
N_δ'	-0.0311	-0.0192	N_δ'	-0.0322	-0.0183
$N_{\delta\delta}'$	0.0102	-0.0032	$N_{ \delta \delta}'$	0.0074	-0.0034
N_{vr}'	-0.3289	-0.2465	$N_{ v r}'$	-0.0790	-0.0790*
N_{vr}'	0.0622	0.0052	$N_{ r v}'$	0.0573	0.0573*
$N_{v\delta}'$	-0.0061	-0.0061*	$N_{ v \delta}'$	-0.0040	-0.0349
$N_{v\delta}'$	0.0102	0.0102*	$N_{ \delta v}'$	0.0047	-0.0024
$N_u^{0'}$	-0.0003*	-0.0003	$N_u^{0'}$	-0.0003*	-0.0003
N_{uv}'	-0.0180*	-0.0180	N_{uv}'	-0.0180*	-0.0180
N_{ur}'	-0.0025*	-0.0025	N_{ur}'	-0.0025*	-0.0025
$N_{u\delta}'$	0.0289*	0.0289	$N_{u\delta}'$	0.0289*	0.0289
$N_{r\delta}'$	0.0032	0.0032*	$N_{ r \delta}'$	-0.0063	-0.0063*
$N_{rr\delta}'$	-0.0018	-0.0018*	$N_{ \delta r}'$	-0.0002	-0.0002*

* Aynı değerler kullanılmıştır.

MMG modelinde olduğu gibi Abkowitz modelinde NMRI ve MOERI' ya ait deneysel verilerden yola çıkılarak hidrodinamik katsayılar hesap edildi. Simülasyonlar aynı şekilde hem NMRI hem de MOERI modellerinin tutsak deneylerinin yapıldığı tekneler için gerçekleştirildi. Aynı zamanda serbest testlerin yapıldığı $L=7$ m ve tam ölçek $L=320$ m büyüklüğündeki tekneler için de simülasyonlar yapıldı.

KVLCC1 teknesi için Şekil 45,46,47'de Model 3, Şekil 48,49,50'de Model 4 uygulamalarının simülasyonları verilmiştir. KVLCC2 teknesi için ise Şekil 51,52,53'te Model 3, Şekil 54,55,56'da Model 4 uygulamalarının simülasyonları verilmiştir.

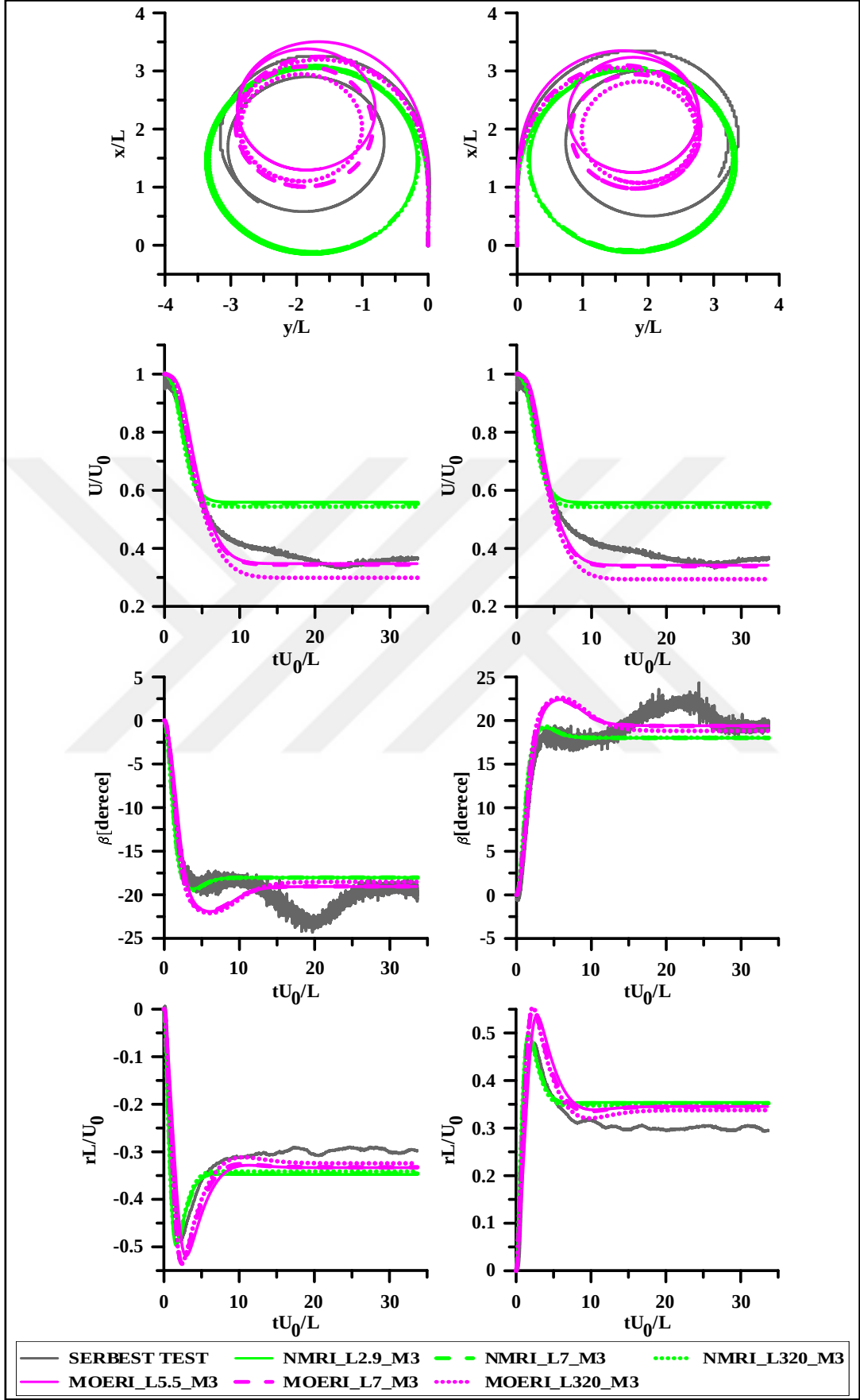
KVLCC1 teknesi için Model 3 simülasyonlarını incelediğimizde, sancak ve iskele için dönme manevralarında hem NMRI hem de MOERI'ya ait simülasyonlarda yörünge eğrileri gerçek değerlerden uzaktadır. Ayrıca farklı büyüklükteki teknelerin yörünge

eğrileri de hemen hemen aynıdır. Zigzag $\pm 10^\circ/\pm 10^\circ$ manevralarını incelediğimizde NMRI ya ait savrulma açısı eğrileri gerçek değerleri yakın çıkmakta MOERI'ya ait olan savrulma açısı eğrileri ise gerçek değerlerden oldukça uzaktır. Benzer durum zigzag $\pm 20^\circ/\pm 20^\circ$ manevralarında da görülmektedir.

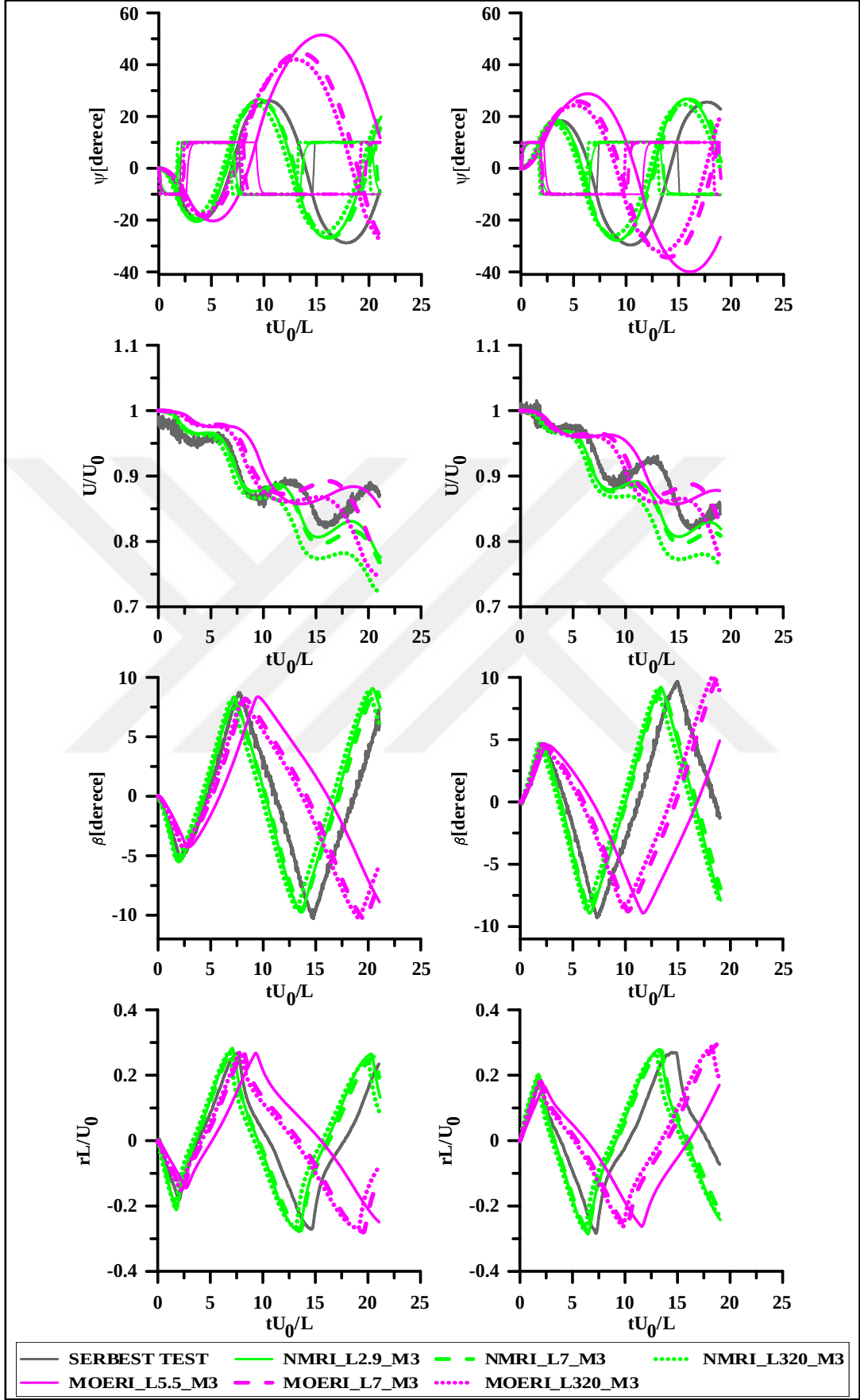
KVLCC1 teknesi için Model 4 simülasyonlarını incelediğimizde, Model 3'te olduğu gibi sancak ve iskele için manevra dönmelerinde yörünge eğrisi gerçek değerlerden uzaktır. Zigzag $\pm 10^\circ/\pm 10^\circ$ manevralarını incelediğimizde Model 3'teki durumun burada da gerçekleştiği görülmektedir. Aynı durumun zigzag $\pm 20^\circ/\pm 20^\circ$ içinde geçerli olduğu söylenebilir.

KVLCC2 teknesi için Model 3 simülasyonlarını incelediğimizde, sancak için dönme manevrasında MOERI'ya ait $L=7$ m ve $L=320$ m için gerçekleştirilmiş simülasyonun yörünge eğrisi gerçek değerlere yakındır. İskele için dönme manevrasında ise MOERI'ya ait simülasyonun yörünge eğrisi sancak dönüşüne göre gerçek değerlerden daha uzaktır. Her iki manevrada NMRI'ya ait simülasyonlar gerçek değerlerden uzaktır. Zigzag $\pm 10^\circ/\pm 10^\circ$ manevralarını incelediğimizde NMRI'ya ait simülasyonun savrulma açısı eğrisi gerçek değerlere daha yakındır. Bu manevrada MOERI'ya ait simülasyon verileri gerçek değerlere yakın değildir. Benzer durum zigzag $\pm 20^\circ/\pm 20^\circ$ manevrası için de geçerlidir.

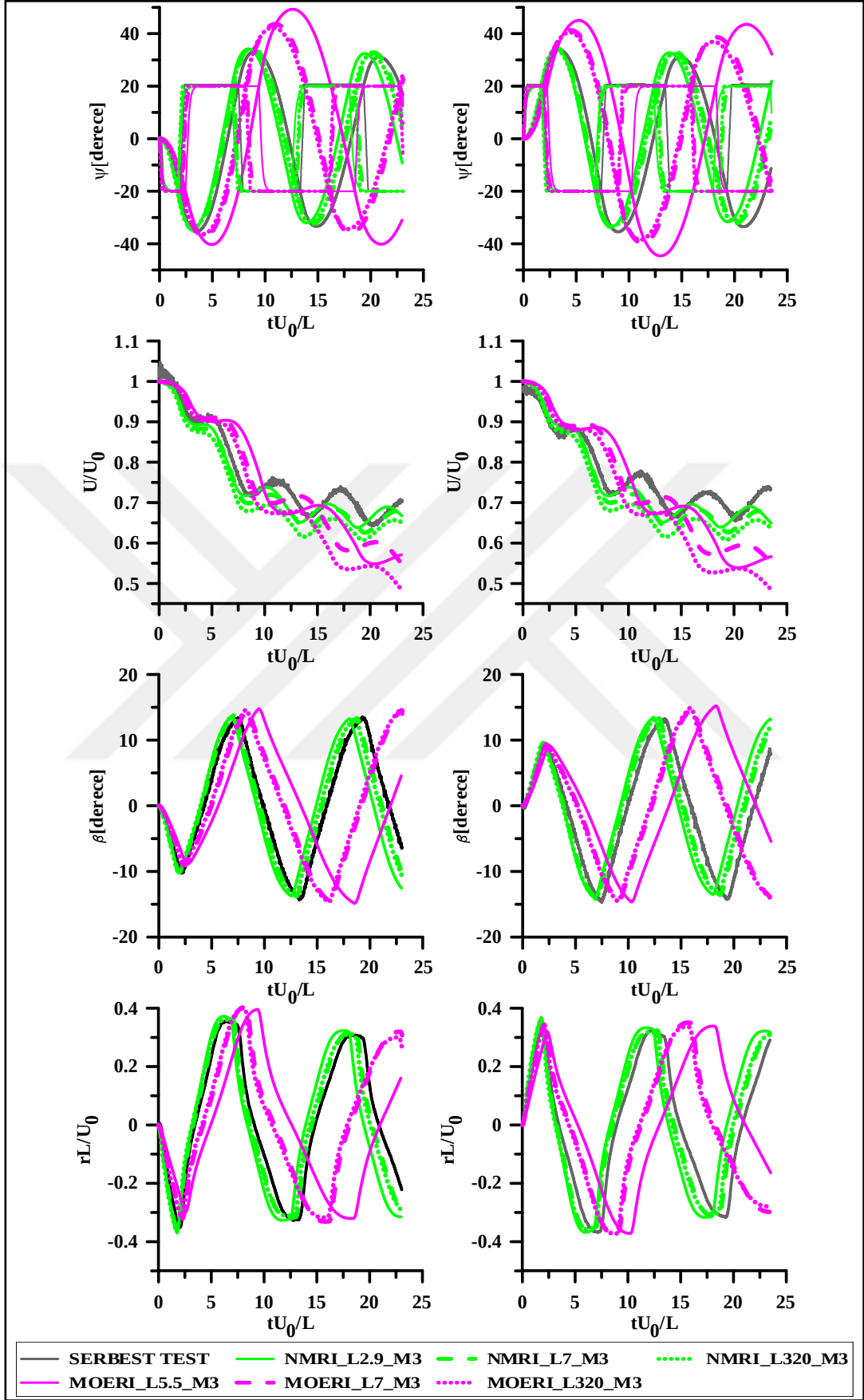
KVLCC2 teknesi için Model 4 simülasyonlarını incelediğimizde, yalnız sancak için dönme manevrasında MOERI'ya ait $L=7$ m ve $L=320$ m için gerçekleştirilmiş simülasyonlar gerçek değerlere yakındır. NMRI'ya ait simülasyonlar gerçek değerden uzaktır. Zigzag $\pm 10^\circ/\pm 10^\circ$ manevralarında gerçek değerlerden uzak olmasıyla birlikte MOERI'ya göre NMRI simülasyonlarının daha doğru sonuç verdiği görülmektedir. Aynı şekilde benzer durumun zigzag $\pm 20^\circ/\pm 20^\circ$ manevrası için de geçerli olduğunu söyleyebiliriz.



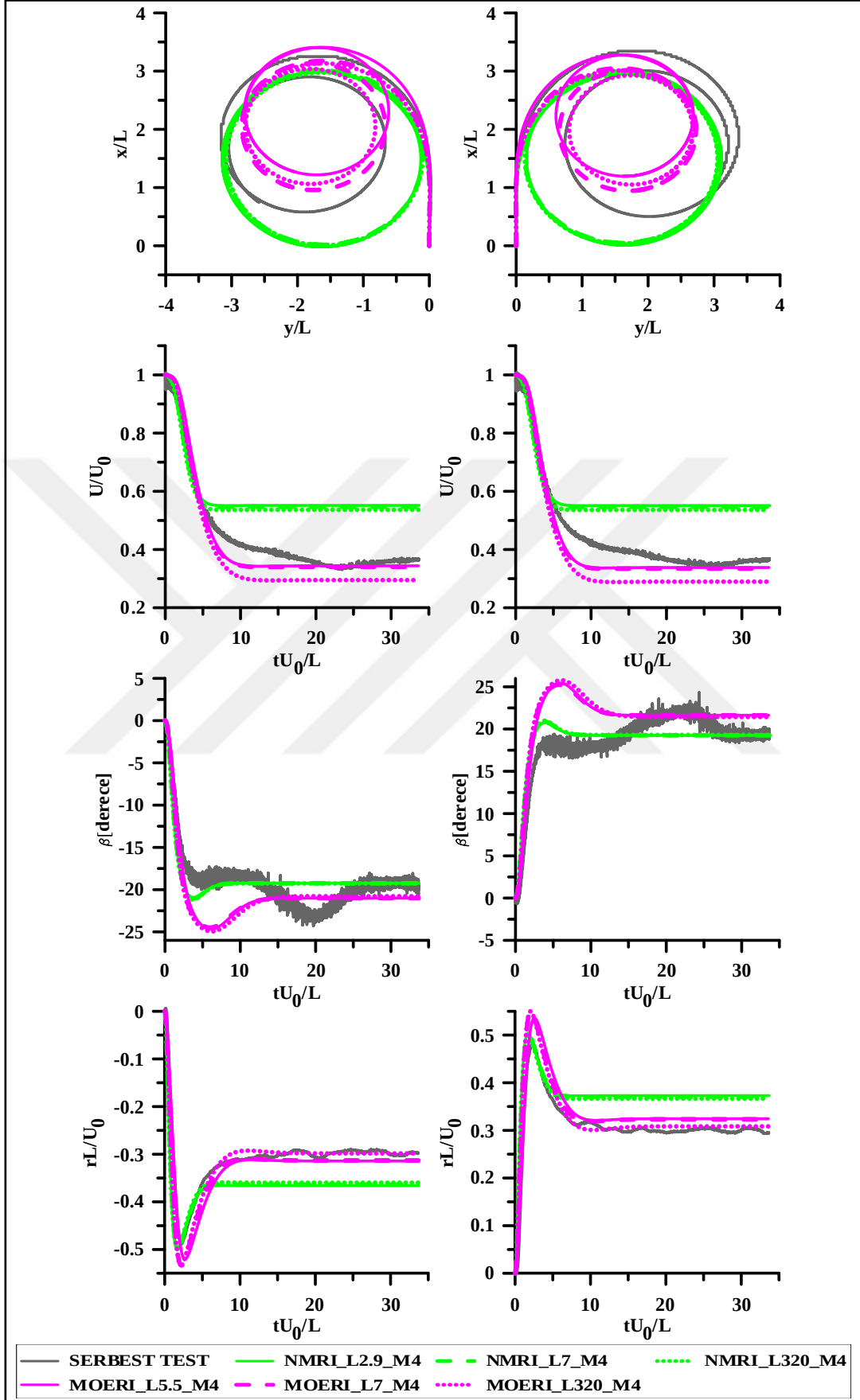
Şekil 45. Dönme manevraları-KVLCC1-MODEL 3 ($\delta=-35^\circ/35^\circ$)



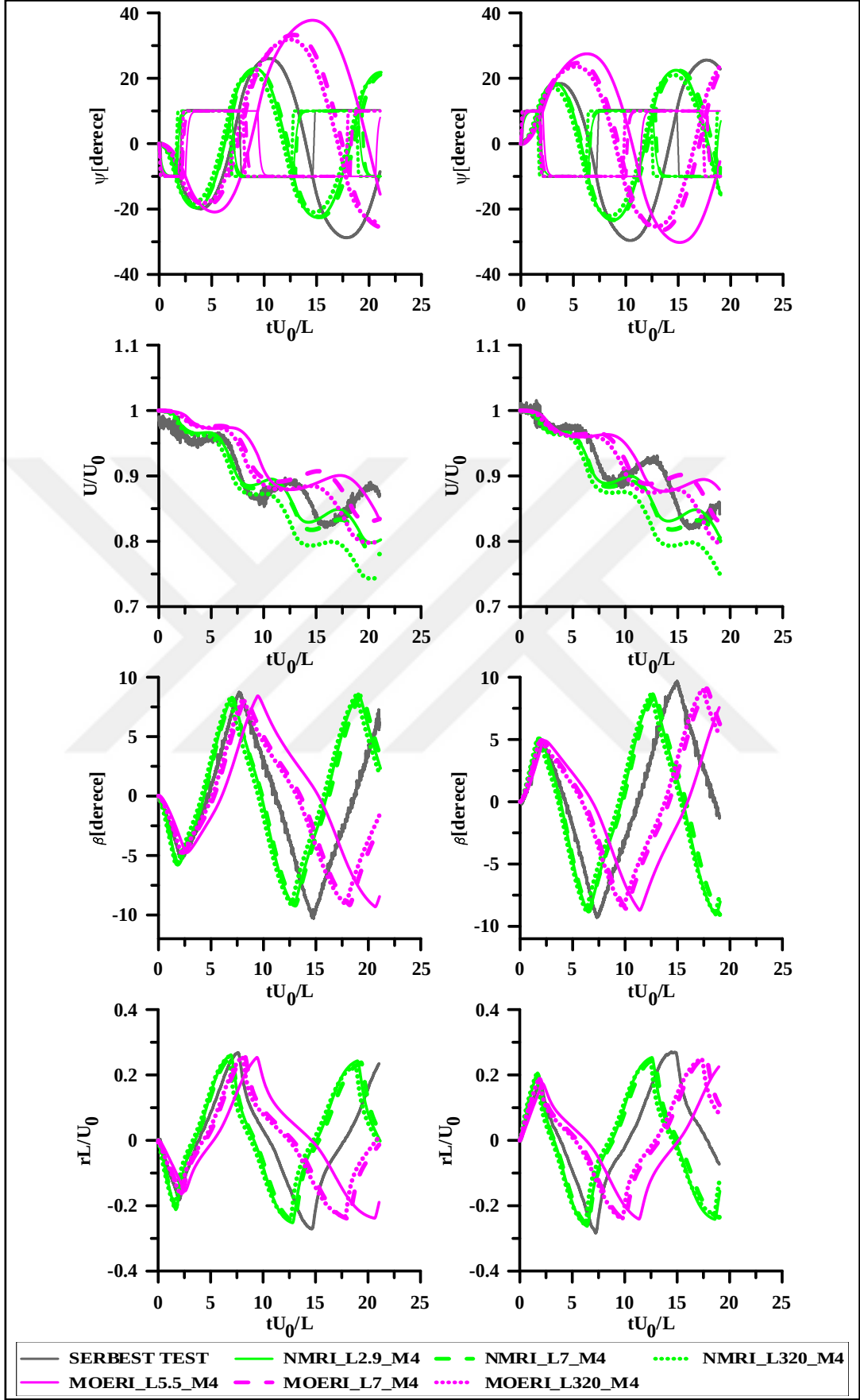
Şekil 46. Zigzag manevraları-KVLCC1-MODEL 3 ($\delta=-10^\circ/10^\circ$ & $10^\circ/-10^\circ$)



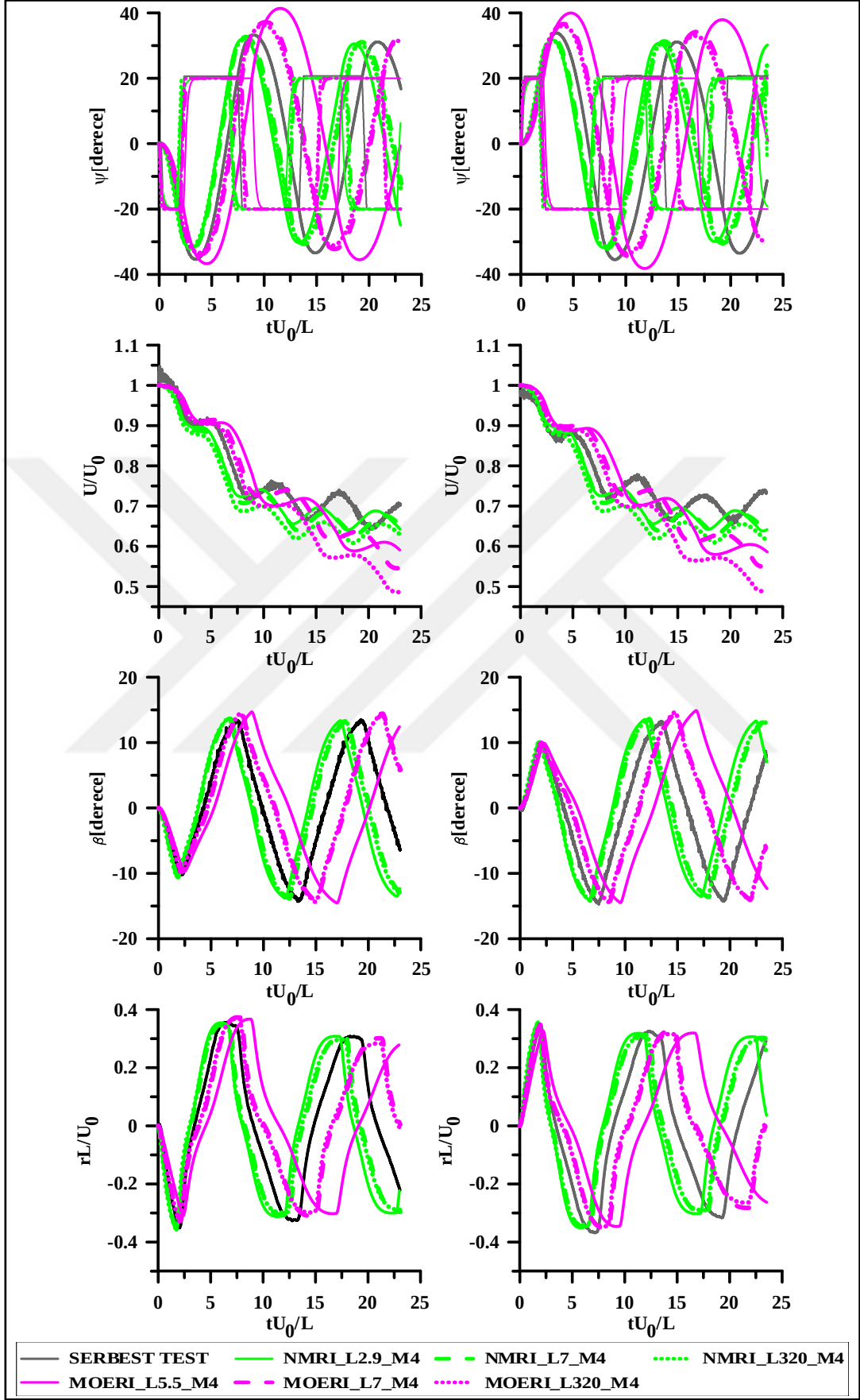
Şekil 47. Zigzag manevraları-KVLCC1-MODEL 3 ($\delta = -20^\circ/20^\circ$ & $20^\circ/-20^\circ$)



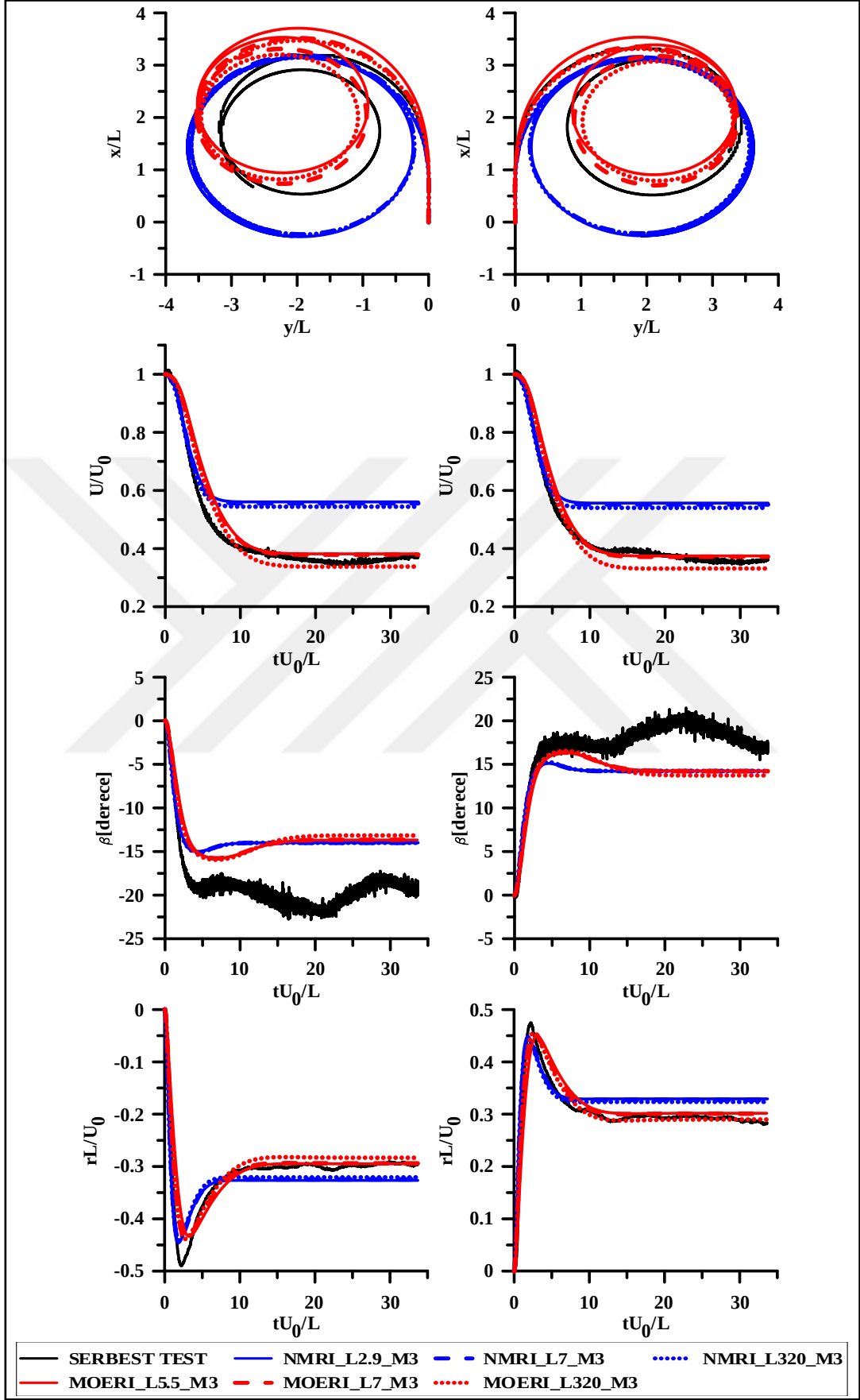
Şekil 48. Dönme manevraları-KVLCC1-MODEL 4 ($\delta=-35^\circ/35^\circ$)



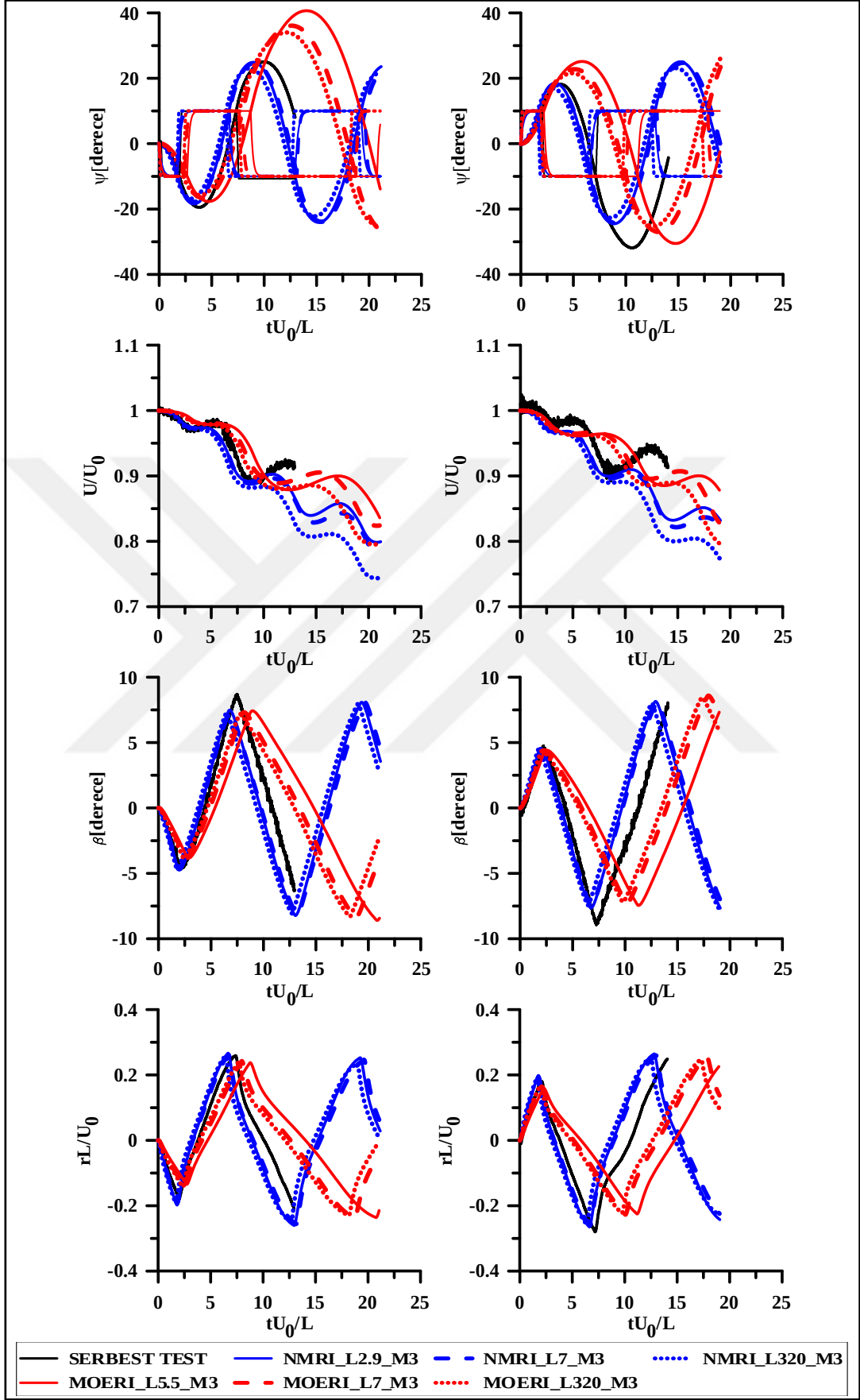
Şekil 49. Zigzag manevraları-KVLCC1-MODEL 4 ($\delta=-10^\circ/10^\circ$ & $10^\circ/-10^\circ$)



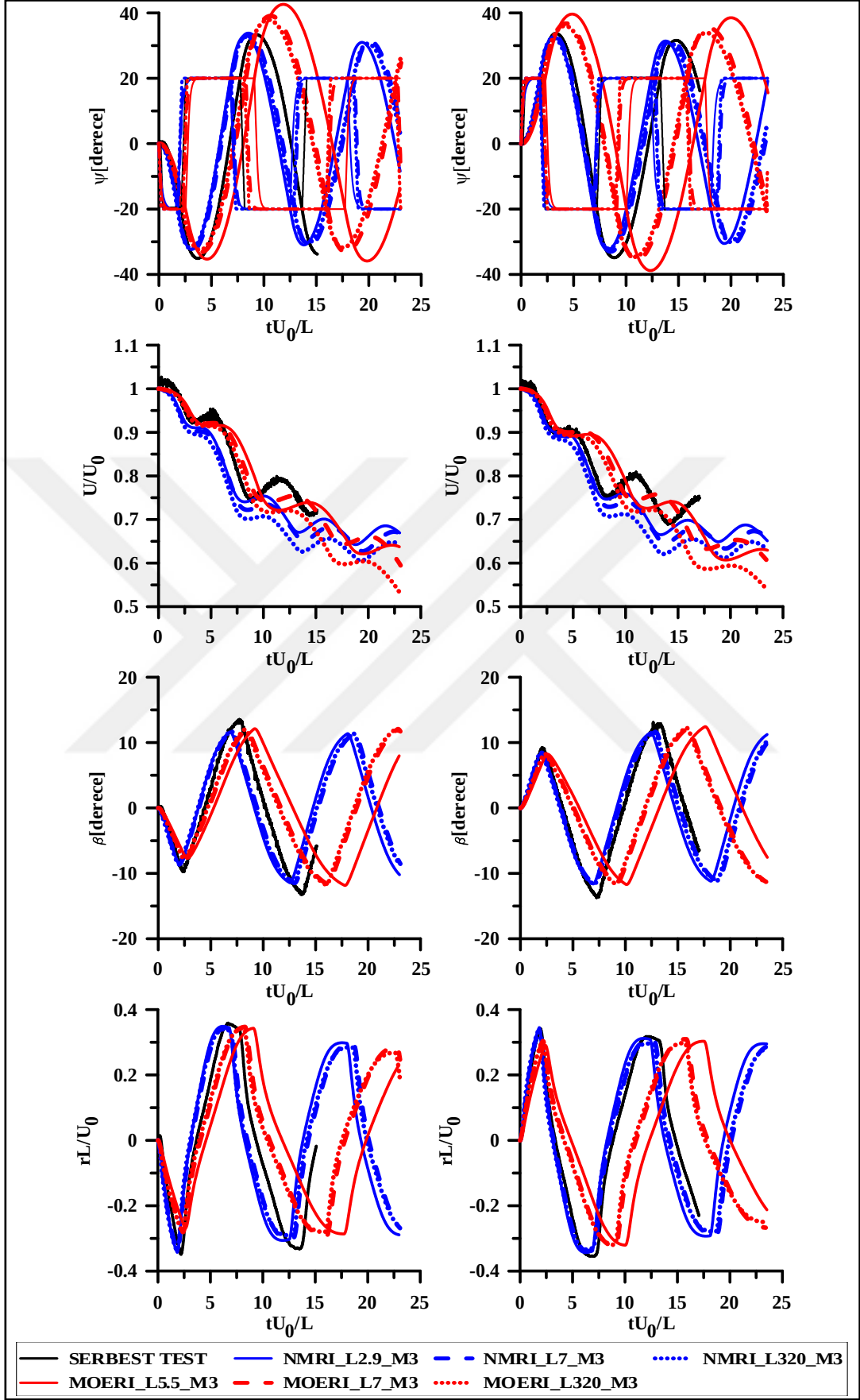
Şekil 50. Zigzag manevraları-KVLCC1-MODEL 4 ($\delta=-20^\circ/20^\circ&20^\circ/-20^\circ$)



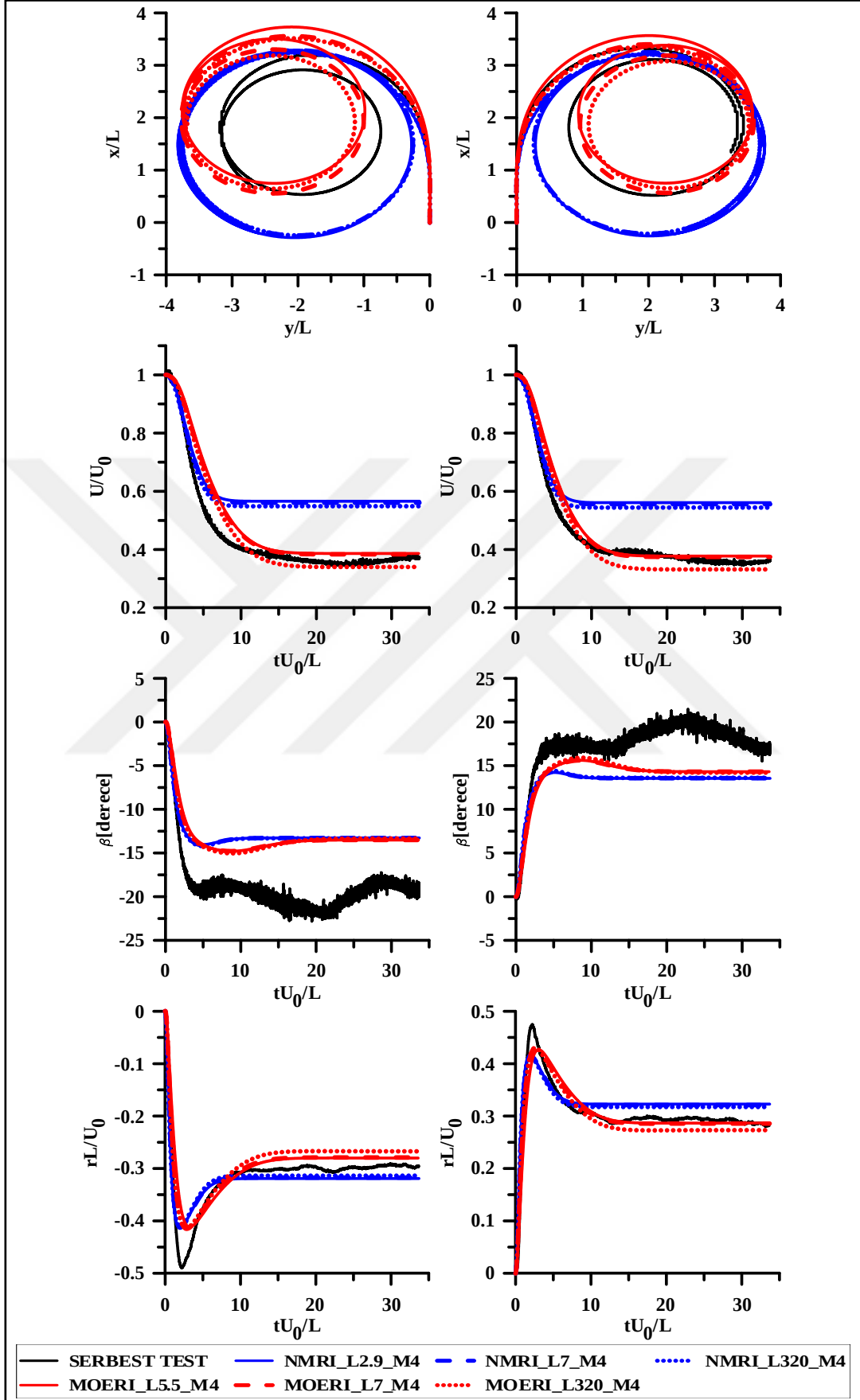
Şekil 51. Dönme manevraları-KVLCC2-MODEL 3 ($\delta = -35^\circ/35^\circ$)



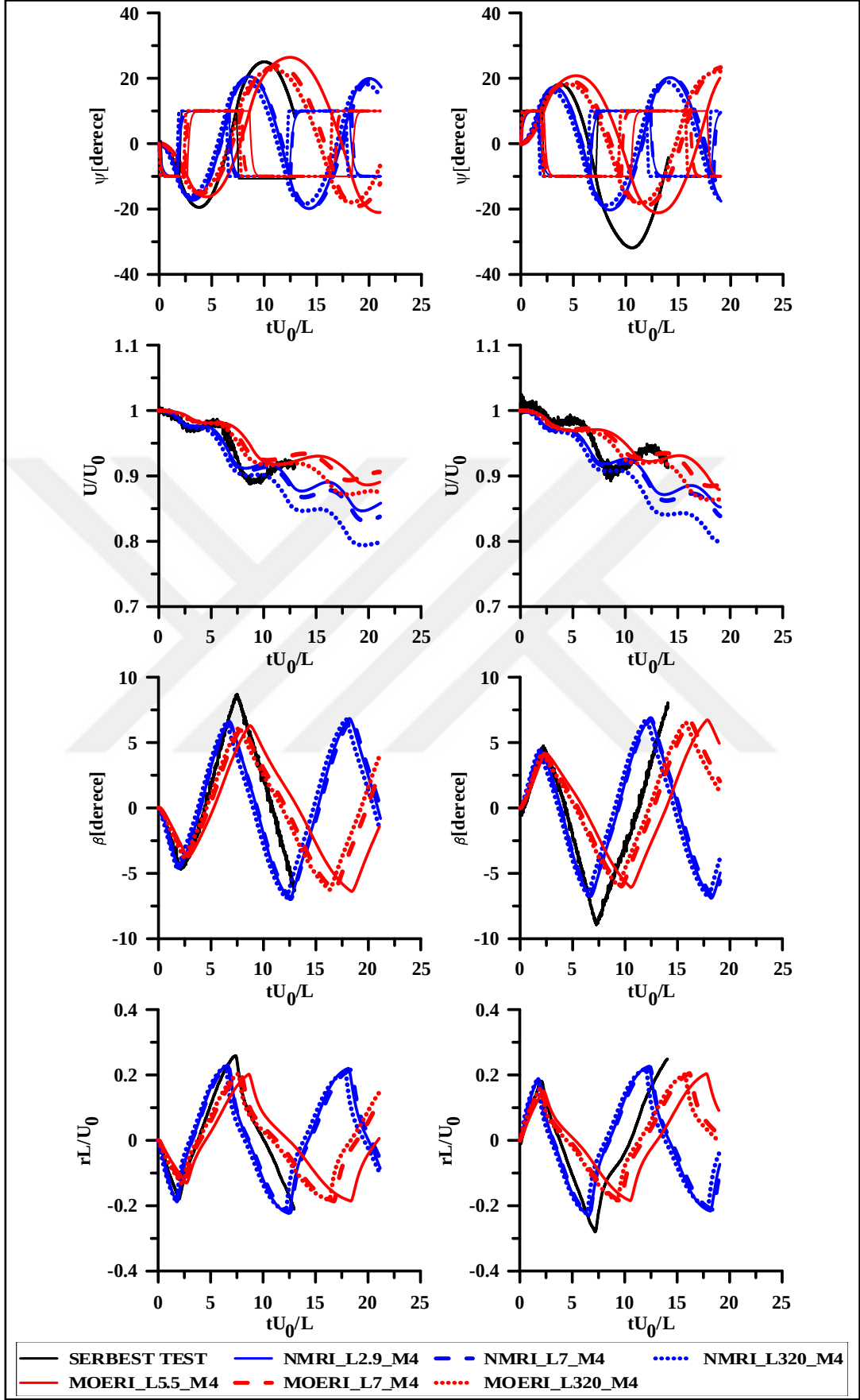
Şekil 52. Zigzag manevraları-KVLCC2-MODEL 3 ($\delta=-10^\circ/10^\circ$ & $10^\circ/-10^\circ$)



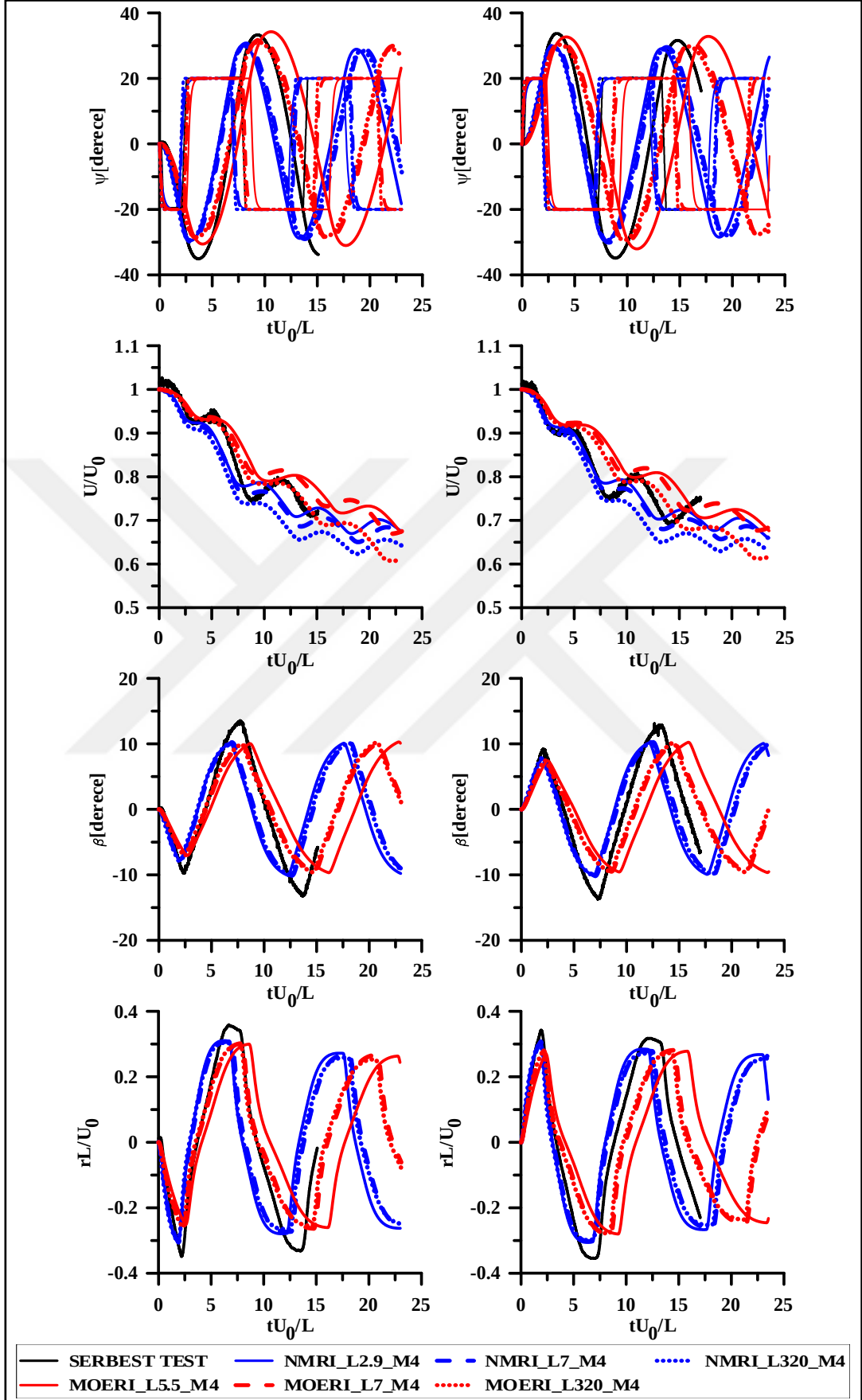
Şekil 53. Zigzag manevraları-KVLCC2-MODEL 3 ($\delta = -20^\circ/20^\circ$ & $20^\circ/-20^\circ$)



Şekil 54. Dönme manevraları-KVLCC2-MODEL 4 ($\delta=-35^\circ/35^\circ$)



Şekil 55. Zigzag manevraları-KVLCC2-MODEL 4 ($\delta = -10^\circ/10^\circ$ & $10^\circ/-10^\circ$)



Şekil 56. Zigzag manevraları-KVLCC2-MODEL 4 ($\delta=-20^\circ/20^\circ&20^\circ/-20^\circ$)

KVLCC1 teknesi için Tablo 38,39 da Model 3'ün, Tablo 40,41'de Model 4'ün, KVLCC2 teknesi için ise Tablo 42,43'te Model 3'in , Tablo 44,45'te Model 4'ün dönme manevra indeksleri olan ilerleme, transfer ve taktik çap ile zigzag manevraları indeksleri olan birinci ve ikinci aşırı dönme açısı verilmiştir.

Tablo 38. KVLCC1-MODEL 3 için dönme manevrası indeksleri

KVLCC1-MODEL 3								
Sim.	İndeks	Serbest Test	NMRI L2.9	NMRI L7	NMRI L320	MOERI L5.5	MOERI L7	MOERI L320
Dönme man. ($\delta=35^\circ$)	A _D '	3.28	2.93	2.96	2.93	3.25	3.00	2.96
	D _T '	3.28	3.27	3.24	3.22	2.70	2.73	2.69
	T _R '	1.30	1.25	1.23	1.22	1.10	1.09	1.07
Dönme man. ($\delta=-35^\circ$)	A _D '	3.19	2.96	2.99	2.96	3.41	3.14	3.10
	D _T '	3.07	3.30	3.28	3.25	2.83	2.85	2.81
	T _R '	1.17	1.25	1.23	1.22	1.15	1.14	1.12

Tablo 39. KVLCC1-MODEL 3 için zigzag manevrası indeksleri

KVLCC1-MODEL 3								
Sim.	İndeks (OSA)	Serbest Test	NMRI L2.9	NMRI L7	NMRI L320	MOERI L5.5	MOERI L7	MOERI L320
Zigzag man. ($10^\circ/-10^\circ$)	1 st	8.4	8.85	8.03	7.12	18.79	15.79	14.32
	2 nd	19.6	17.84	17.55	15.89	29.97	24.36	22.26
Zigzag man. ($-10^\circ/10^\circ$)	1 st	10	10.58	9.67	8.51	10.35	8.38	7.59
	2 nd	16.1	16.66	16.25	14.67	41.46	34.51	32.01
Zigzag man. ($20^\circ/-20^\circ$)	1 st	13.9	14.07	14.28	13.74	25.04	21.25	20.51
	2 nd	15.5	13.61	14.35	13.38	24.61	19.70	18.41
Zigzag man. ($-20^\circ/20^\circ$)	1 st	15.4	14.09	14.73	13.98	20.31	17.13	16.36
	2 nd	13.2	14.18	14.69	13.96	29.28	23.60	22.37

Tablo 40. KVLCC1-MODEL 4 için dönme manevrası indeksleri

KVLCC1-MODEL 4								
Sim.	İndeks	Serbest Test	NMRI L2.9	NMRI L7	NMRI L320	MOERI L5.5	MOERI L7	MOERI L320
Dönme man. ($\delta=35^\circ$)	A_D	3.28	2.86	2.89	2.85	3.16	2.93	2.89
	D_T	3.28	3.03	3.00	2.97	2.59	2.63	2.59
	T_R	1.30	1.13	1.11	1.10	1.02	1.01	1.00
Dönme man. ($\delta=-35^\circ$)	A_D	3.19	2.88	2.91	2.88	3.29	3.06	3.01
	D_T	3.07	3.06	3.03	3.00	2.71	2.75	2.70
	T_R	1.17	1.13	1.11	1.10	1.06	1.06	1.04

Tablo 41. KVLCC1-MODEL 4 için zigzag manevrası indeksleri

KVLCC1-MODEL 4								
Sim.	İndeks (OSA)	Serbest Test	NMRI L2.9	NMRI L7	NMRI L320	MOERI L5.5	MOERI L7	MOERI L320
Zigzag man. ($10^\circ/-10^\circ$)	1 st	8.4	8.47	8.01	7.08	17.48	14.68	13.60
	2 nd	19.6	13.39	13.32	12.10	20.22	16.55	15.34
Zigzag man. ($-10^\circ/10^\circ$)	1 st	10	9.63	8.99	8.00	10.91	8.88	8.99
	2 nd	16.1	12.99	12.74	11.54	27.74	23.25	21.87
Zigzag man. ($20^\circ/-20^\circ$)	1 st	13.9	11.76	12.25	11.75	19.95	16.58	16.03
	2 nd	15.5	11.78	12.06	11.42	18.17	14.48	13.61
Zigzag man. ($-20^\circ/20^\circ$)	1 st	15.4	12.25	12.32	11.83	16.71	13.90	13.41
	2 nd	13.2	12.14	12.61	11.84	21.37	17.16	16.19

Tablo 42. KVLCC2-MODEL 3 için dönme manevrası indeksleri

KVLCC2-MODEL 3								
Sim.	İndeks	Serbest Test	NMRI L2.9	NMRI L7	NMRI L320	MOERI L5.5	MOERI L7	MOERI L320
Dönme man. ($\delta=35^\circ$)	A_D	3.25	3.05	3.09	3.05	3.47	3.29	3.25
	D_T	3.34	3.57	3.54	3.51	3.30	3.32	3.27
	T_R	1.36	1.48	1.46	1.45	1.45	1.44	1.43
Dönme man. ($\delta=-35^\circ$)	A_D	3.11	3.09	3.12	3.09	3.65	3.46	3.41
	D_T	3.08	3.62	3.59	3.56	3.47	3.48	3.43
	T_R	1.22	1.49	1.48	1.47	1.53	1.52	1.51

Tablo 43. KVLCC2-MODEL 3 için zigzag manevrası indeksleri

KVLCC2-MODEL 3								
Sim.	İndeks (OSA)	Serbest Test	NMRI L2.9	NMRI L7	NMRI L320	MOERI L5.5	MOERI L7	MOERI L320
Zigzag man. ($10^\circ/-10^\circ$)	1 st	8.2	8.50	7.94	6.89	15.14	12.75	11.56
	2 nd	21.9	14.50	14.25	12.69	20.53	17.00	15.28
Zigzag man. ($-10^\circ/10^\circ$)	1 st	9.5	8.44	7.83	6.84	7.69	6.59	5.78
	2 nd	15	14.88	14.66	13.09	30.65	26.08	24.00
Zigzag man. ($20^\circ/-20^\circ$)	1 st	13.7	12.77	12.93	12.39	19.62	16.73	16.03
	2 nd	14.9	12.40	13.00	12.16	18.81	15.54	14.60
Zigzag man. ($-20^\circ/20^\circ$)	1 st	15.1	12.36	12.72	12.16	15.31	13.15	12.51
	2 nd	13.3	13.03	13.57	12.74	22.60	19.05	17.89

Tablo 44. KVLCC2-MODEL 4 için dönme manevrası indeksleri

KVLCC2-MODEL 4								
Sim.	İndeks	Serbest Test	NMRI L2.9	NMRI L7	NMRI L320	MOERI L5.5	MOERI L7	MOERI L320
Dönme man. ($\delta=35^\circ$)	A_D	3.25	3.16	3.18	3.15	3.51	3.34	3.30
	D_T	3.34	3.71	3.68	3.64	3.52	3.54	3.49
	T_R	1.36	1.58	1.56	1.54	1.57	1.56	1.55
Dönme man. ($\delta=-35^\circ$)	A_D	3.11	3.19	3.22	3.18	3.68	3.50	3.46
	D_T	3.08	3.77	3.74	3.70	3.71	3.72	3.66
	T_R	1.22	1.60	1.58	1.57	1.66	1.65	1.63

Tablo 45. KVLCC2-MODEL 4 için zigzag manevrası indeksleri

KVLCC2-MODEL 4								
Sim.	İndeks (OSA)	Serbest Test	NMRI L2.9	NMRI L7	NMRI L320	MOERI L5.5	MOERI L7	MOERI L320
Zigzag man. ($10^\circ/10^\circ$)	1 st	8.2	7.35	6.76	5.98	10.78	9.13	8.23
	2 nd	21.9	10.29	9.89	8.87	11.12	9.07	8.17
Zigzag man. ($-10^\circ/10^\circ$)	1 st	9.5	7.28	6.74	5.92	6.26	5.21	4.63
	2 nd	15	10.53	10.24	9.15	16.40	13.79	12.74
Zigzag man. ($20^\circ/20^\circ$)	1 st	13.7	9.84	10.21	9.61	12.66	10.88	10.28
	2 nd	14.9	9.69	10.08	9.47	12.05	9.88	9.33
Zigzag man. ($-20^\circ/20^\circ$)	1 st	15.1	9.49	10.02	9.45	10.58	8.91	8.50
	2 nd	13.3	10.16	10.56	9.88	14.24	11.81	11.06

2.2.5. Blanke Modeli Uygulaması

Blanke modelinde pek çok basitleştirmeye gidilmiş olsa da burada Abkowitz modeline benzer bir yaklaşım göz önüne alınmıştır. Yalnızca pervane kuvveti dikkate alınıp direnç hesabı da değiştirilerek boyuna doğrultudaki kuvvet modellenmiştir. Sonuç olarak X doğrultusundaki toplam kuvvet aşağıdaki yazılabilir:

$$\begin{aligned}
X = & X_{|u|u} |u|u + X_{\dot{u}} \dot{u} + X_v v + X_{vv} v^2 + X_{vvv} v^3 + X_{vvvv} v^4 \\
& + X_{rr} r^2 + X_{\delta\delta} \delta^2 + X_{vr} vr + X_{v\delta} v\delta + X_{r\delta} r\delta + X_p
\end{aligned} \tag{258}$$

Burada X_p

$$\begin{aligned}
X_p = & (1-t_p) T_p = (1-t_p) \rho n^2 D_p^4 K_T(J) \\
K_T(J) = & a_0 + a_1 J + a_2 J^2 \\
J = & u(1-w_p) / (n D_p)
\end{aligned} \tag{259}$$

şeklindedir. Toplam yanal kuvvet ve toplam savrulma momenti Abkowitz modelinde olduğu gibi aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

Model 5:

$$\begin{aligned}
Y = & Y^0 + Y_u^0 \Delta U + Y_v v + Y_r r + Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{\dot{r}} \dot{r} + Y_{\delta} \delta \\
& + Y_{uv} \Delta U v + Y_{ur} \Delta U r + Y_{u\delta} \Delta U \delta + Y_{vvv} v^3 + Y_{rrr} r^3 + Y_{\delta\delta\delta} \delta^3 \\
& + Y_{vvr} v^2 r + Y_{vv\delta} v^2 \delta + Y_{vrr} vr^2 + Y_{v\delta\delta} v\delta^2 + Y_{r\delta\delta} r\delta^2 + Y_{rr\delta} \delta r^2 \\
N = & N^0 + N_u^0 \Delta U + N_v v + N_r r + N_{\dot{v}} \dot{v} + N_{\dot{r}} \dot{r} + N_{\delta} \delta \\
& + N_{uv} \Delta U v + N_{ur} \Delta U r + N_{u\delta} \Delta U \delta + N_{vvv} v^3 + N_{rrr} r^3 + N_{\delta\delta\delta} \delta^3 \\
& + N_{vvr} v^2 r + N_{vv\delta} v^2 \delta + N_{vrr} vr^2 + N_{v\delta\delta} v\delta^2 + N_{r\delta\delta} r\delta^2 + N_{rr\delta} \delta r^2
\end{aligned} \tag{260}$$

Model 6:

$$\begin{aligned}
Y = & Y^0 + Y_u^0 \Delta U + Y_v v + Y_r r + Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{\dot{r}} \dot{r} + Y_{\delta} \delta \\
& + Y_{uv} \Delta U v + Y_{ur} \Delta U r + Y_{u\delta} \Delta U \delta + Y_{|v|v} |v|v + Y_{|r|r} |r|r + Y_{|\delta|\delta} |\delta|\delta \\
& + Y_{|v|r} |v|r + Y_{|r|v} |r|v + Y_{|v|\delta} |v|\delta + Y_{|\delta|v} |\delta|v + Y_{|r|\delta} |r|\delta + Y_{|\delta|r} |\delta|r \\
N = & N^0 + N_u^0 \Delta U + N_v v + N_r r + N_{\dot{v}} \dot{v} + N_{\dot{r}} \dot{r} + N_{\delta} \delta \\
& + N_{uv} \Delta U v + N_{ur} \Delta U r + N_{u\delta} \Delta U \delta + N_{|v|v} |v|v + N_{|r|r} |r|r + N_{|\delta|\delta} |\delta|\delta \\
& + N_{|v|r} |v|r + N_{|r|v} |r|v + N_{|v|\delta} |v|\delta + N_{|\delta|v} |\delta|v + N_{|r|\delta} |r|\delta + N_{|\delta|r} |\delta|r
\end{aligned} \tag{261}$$

Bu modelde pervaneye ait büyüklükler için MMG modelindeki değerler, hidrodinamik katsayılar için ise Abkowitz modelindeki değerler kullanılmıştır. Yalnızca direnç kuvvetine ait $X_{|u|u}$ terimi için Tablo 46'daki değerler hesap edilmiştir.

Tablo 46. KVLCC1 ve KVLCC2 teknelerinin direnç kuvveti ile ilgili hidrodinamik katsayı

		NMRI			MOERI		
	Lpp (m)	2.9091	7.0000	320	5.5172	7.0000	320
KVLCC1	$X_{ u u}$	-0.0213	-0.0169	-0.0078	-0.0169	-0.0161	-0.0074
KVLCC2	$X_{ u u}$	-0.0216	-0.0172	-0.0081	-0.0170	-0.0162	-0.0077

Blanke modeli uygulamasında MMG ve Abkowitz modelindeki NMRI ve MOERI'ya ait hidrodinamik katsayılar ve ilgili parametreler kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirildi. Simülasyonlar MMG ve Abkowitz modeli uygulamalarında olduğu gibi üç farklı büyüklükteki tekne için yapıldı.

KVLCC1 teknesi için Şekil 57,58,59'da Model 5, Şekil 60,61,61'de Model 6 uygulamalarının simülasyonları verilmiştir. KVLCC2 teknesi için ise Şekil 62,63,64'te Model 5, Şekil 66,67,68'de Model 6 uygulamalarının simülasyonları verilmiştir.

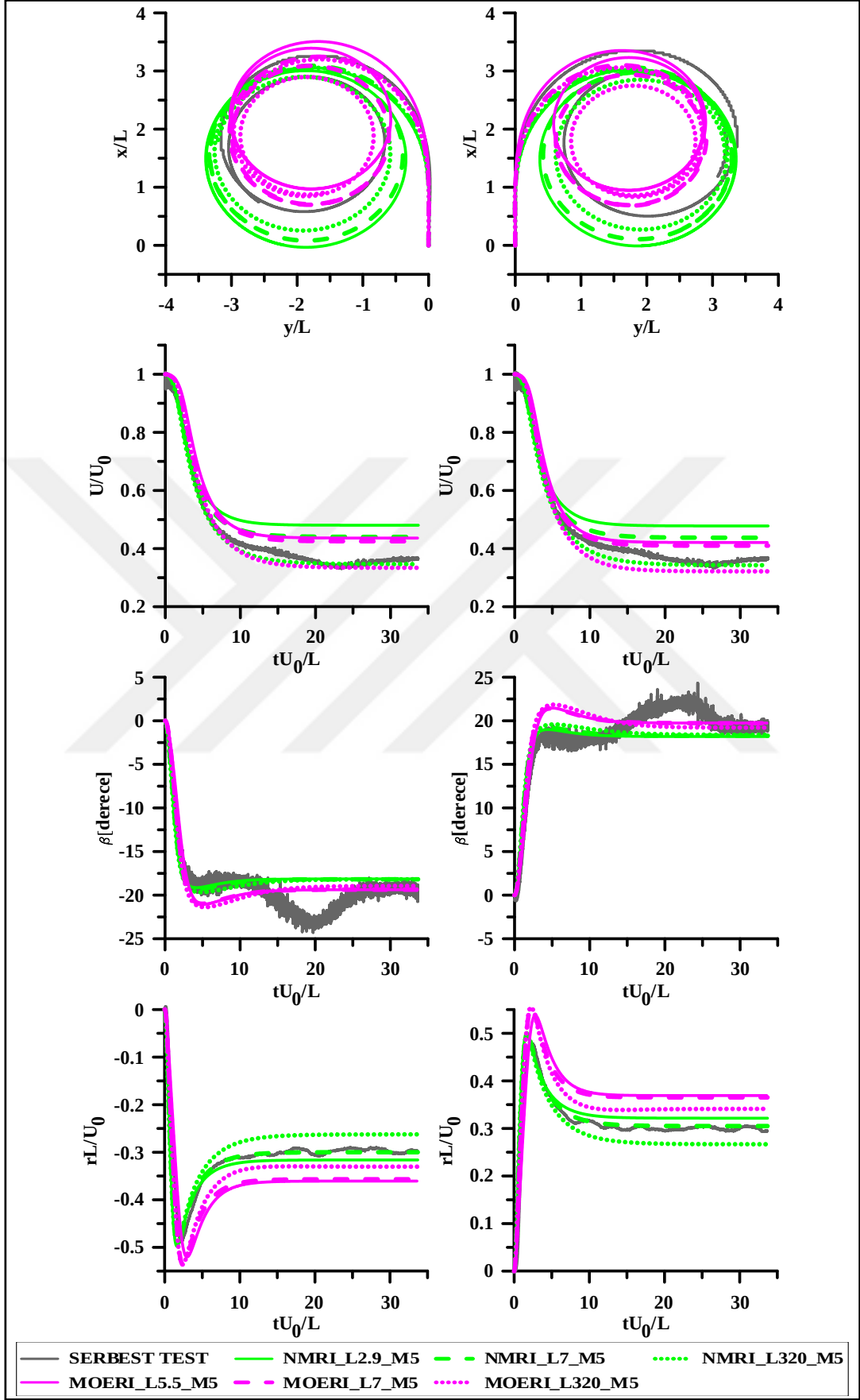
KVLCC1 teknesi için Model 5 simülasyonlarını incelediğimizde, sancak için dönme manevrasında yörünge eğrileri her iki durum için gerçek değerlerden uzaktadır. Yalnızca iskele için dönme manevrasında L=320 m için gerçekleştirilmiş MOERI simülasyonunda gerçek değerler uyum göstermektedir. Zigzag $\pm 10^\circ/\pm 10^\circ$ manevralarını incelediğimizde MOERI'ya ait simülasyonlarda savrulma açısı eğrisi gerçek değerlerden oldukça uzaktadır. NMRI'ya ait savrulma açısı eğrisi gerçek değerlerle daha iyi uyum göstermektedir. Benzer durum zigzag $\pm 20^\circ/\pm 20^\circ$ manevralarında da görülmektedir.

KVLCC1 teknesi için Model 6 simülasyonlarını incelediğimizde, sancak için dönme manevrasında Model 5'teki durum ile benzerlik göstermektedir. İskele için dönme manevrasında ise nispeten MOERI'ya ait simülasyonlar gerçek değerlerle uyumludur. Zigzag $\pm 10^\circ/\pm 10^\circ$ manevralarını incelediğimizde NMRI'ya ait savrulma açısı eğrileri

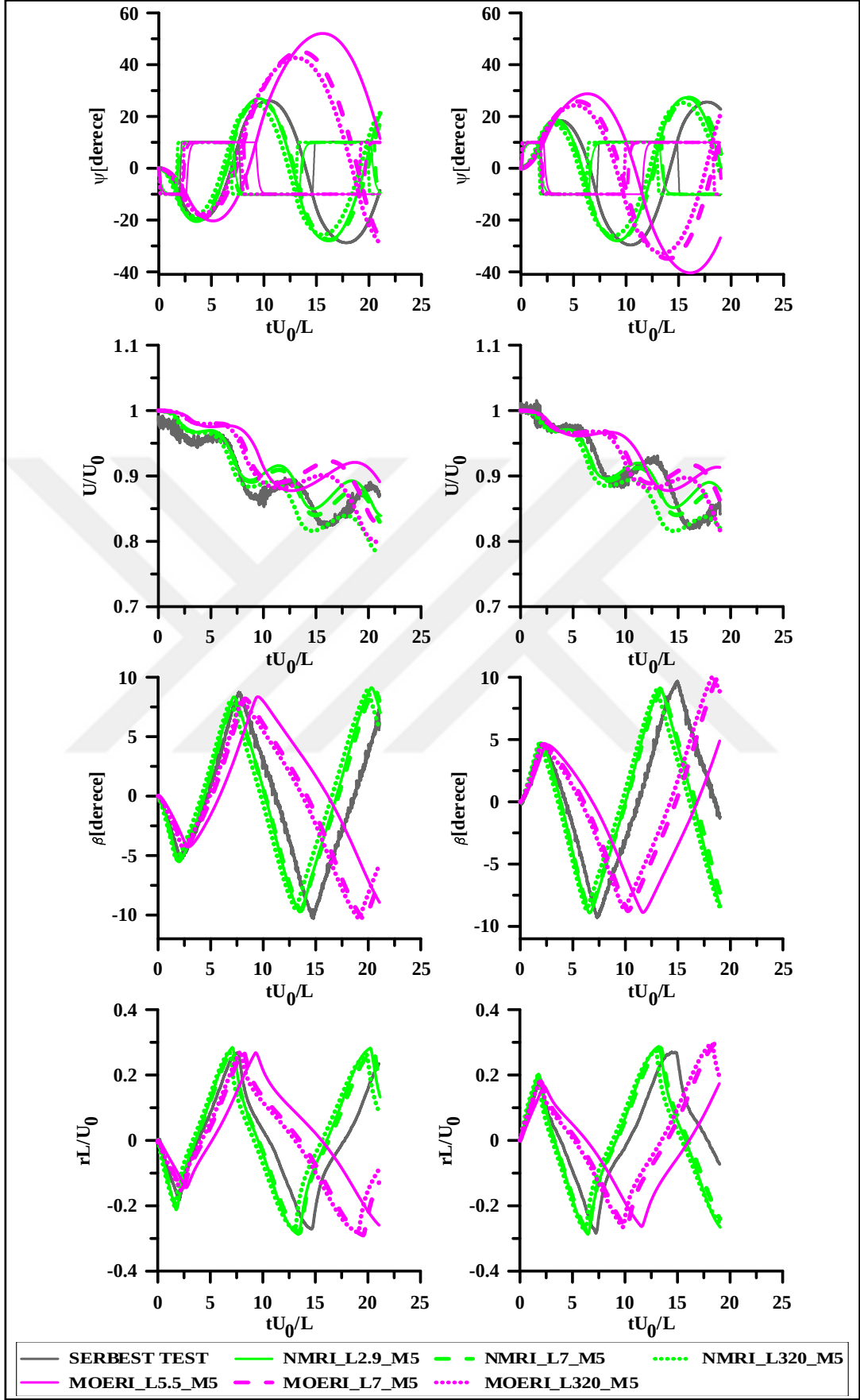
gerçek değerlerle uyumlu iken MOERI'ya ait eğriler gerçek değerlerden uzaktadır. Benzer durum zigzag $\pm 20^\circ/\pm 20^\circ$ manevraları için de geçerlidir.

KVLCC2 teknesi için Model 5 simülasyonlarını incelediğimizde, sancak için dönme manevrasında MOERI için $L=320$ m simülasyonunun yörünge eğrisi tam bir uyum göstermektedir. İskele için manevra dönmesinde simülasyonların gerçek değerlerle uyumu iyi değildir. Zigzag $\pm 10^\circ/\pm 10^\circ$ ve Zigzag $\pm 20^\circ/\pm 20^\circ$ manevralarında KVLCC1 teknesinin Model 5 için gerçekleştirilen simülasyonlarına benzer durumlarla karşılaşmaktadır.

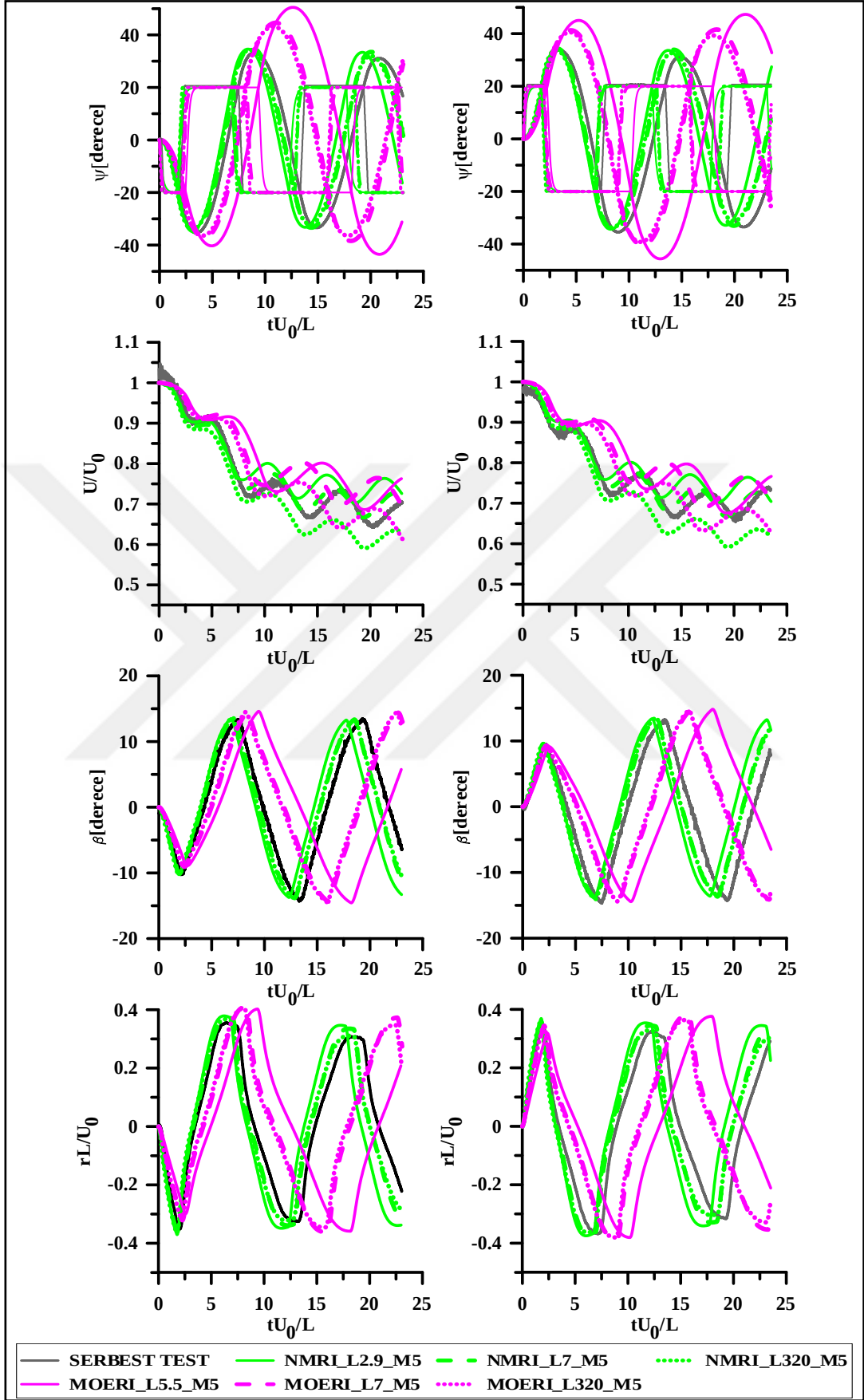
KVLCC2 teknesi için Model 6 simülasyonlarını incelediğimizde, sancak için dönme manevrasında Model 5'de olduğu gibi $L=320$ m için olan simülasyonunu yörünge eğrisi gerçek değerlere daha yakın çıkmaktadır. Fakat iskele için dönme manevralarında simülasyonların yörünge eğrileri için benzer bir başarı görülmemektedir. Zigzag $\pm 10^\circ/\pm 10^\circ$ manevralarını incelediğimizde NMRI'ya ait savrulma açısı eğrileri gerçek değerler daha uyumludur. Zigzag $\pm 20^\circ/\pm 20^\circ$ manevrasında ise NMRI ve MOERI'ya ait savrulma eğrileri benzer hatalara sahiptir.



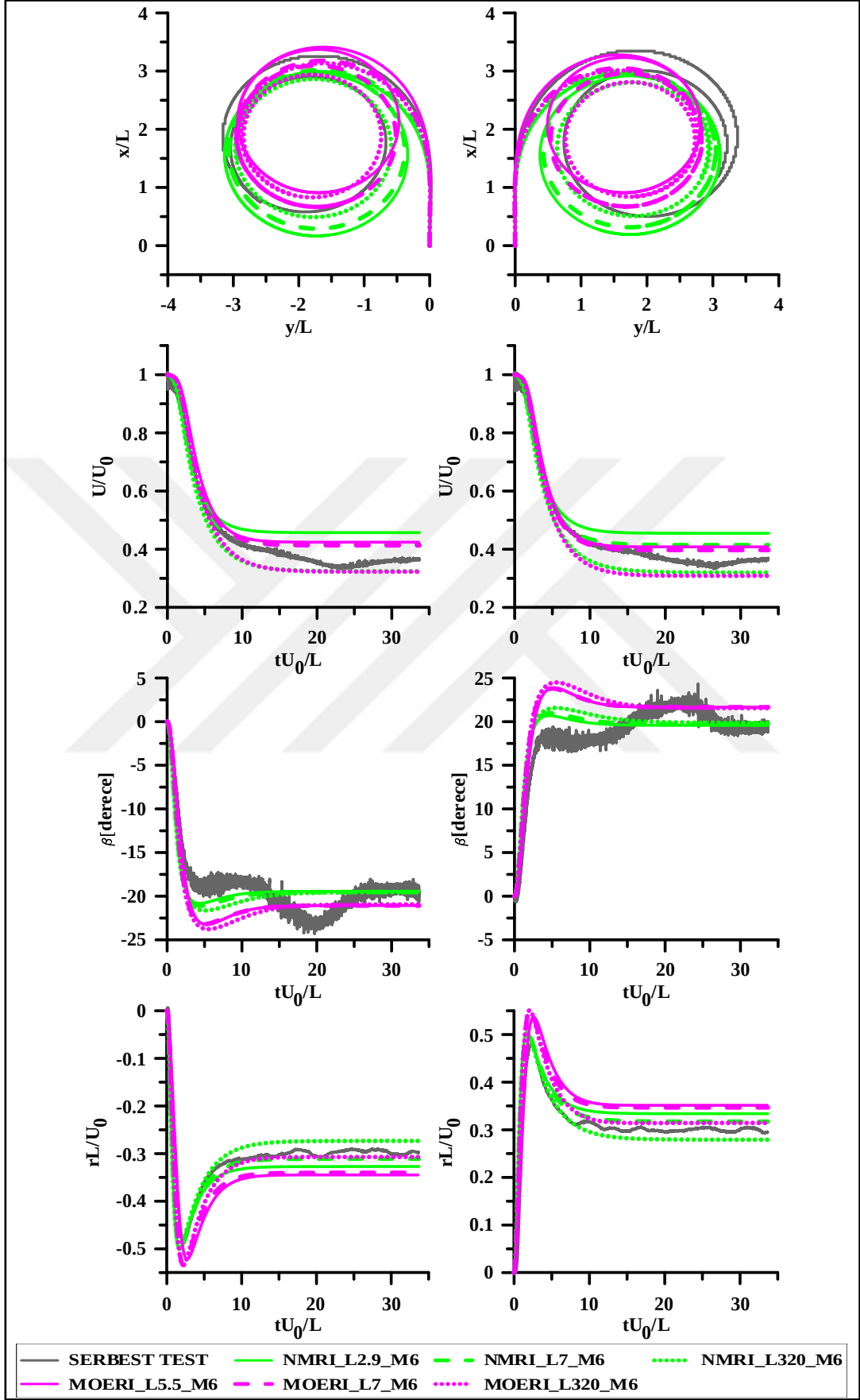
Şekil 57. Dönme manevraları-KVLCC1-MODEL 5 ($\delta=-35^\circ/35^\circ$)



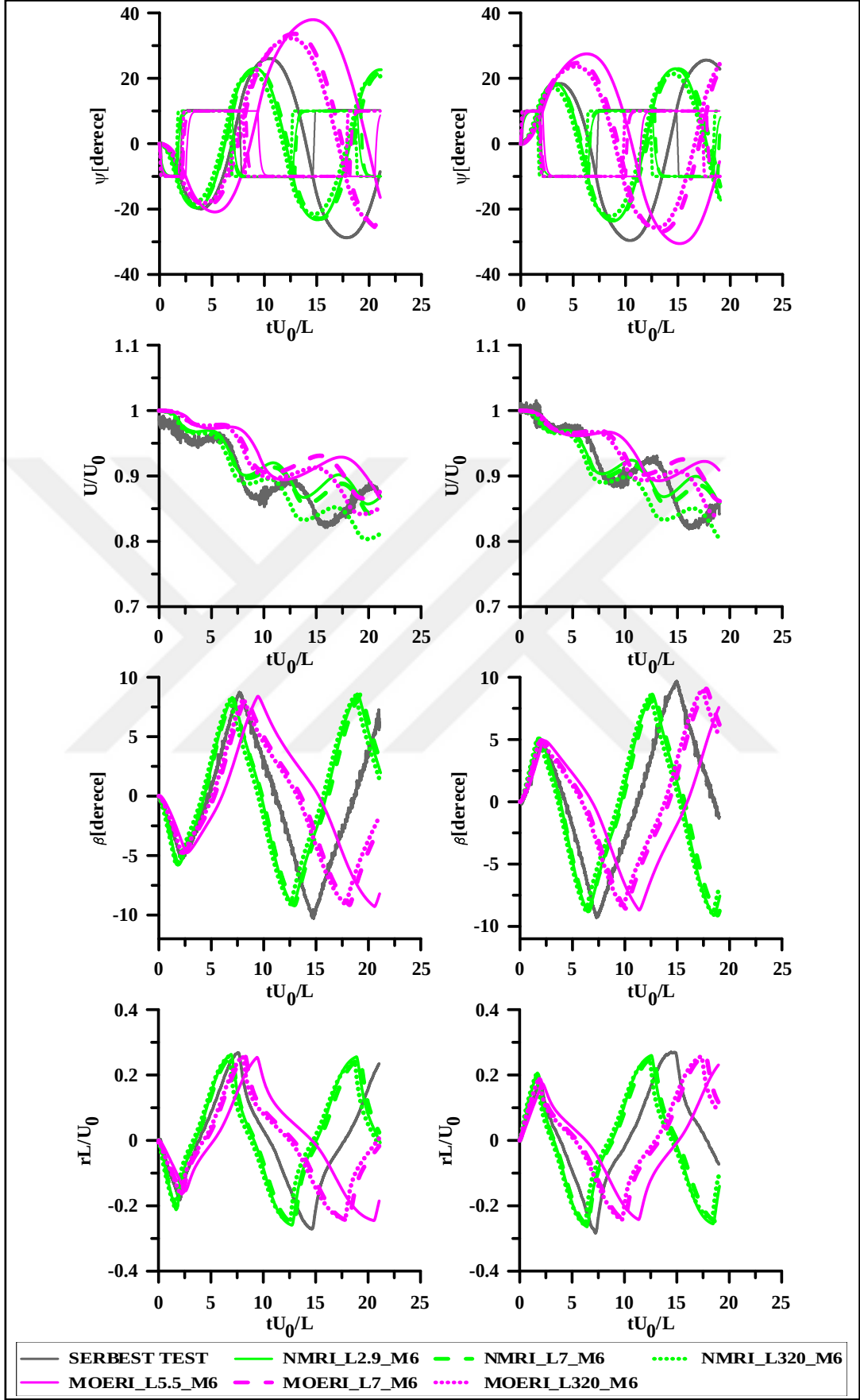
Şekil 58. Zigzag manevraları-KVLCC1-MODEL 5 ($\delta=-10^\circ/10^\circ$ & $10^\circ/-10^\circ$)



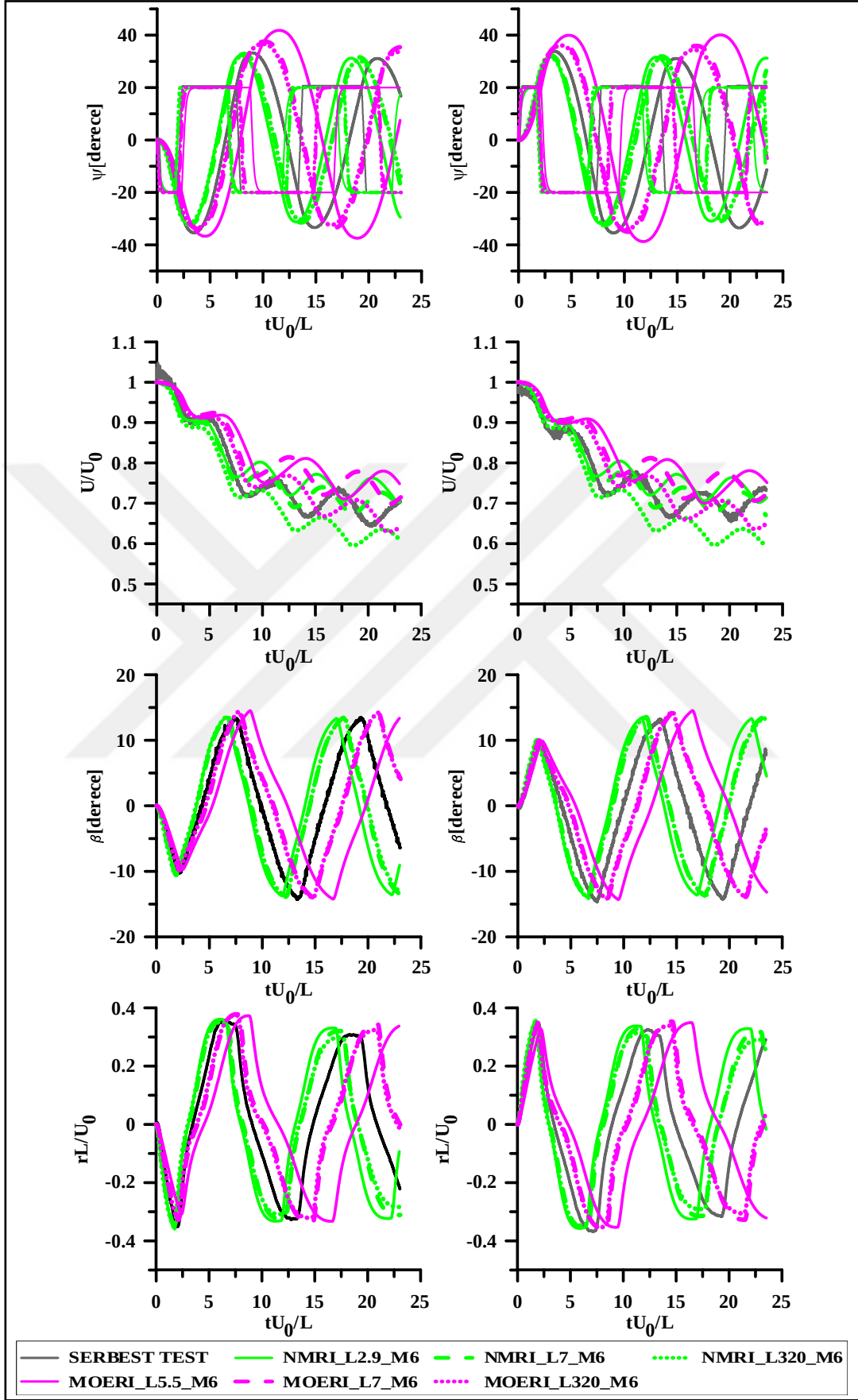
Şekil 59. Zigzag manevraları-KVLCC1-MODEL 5 ($\delta=-20^\circ/20^\circ$ & $20^\circ/-20^\circ$)



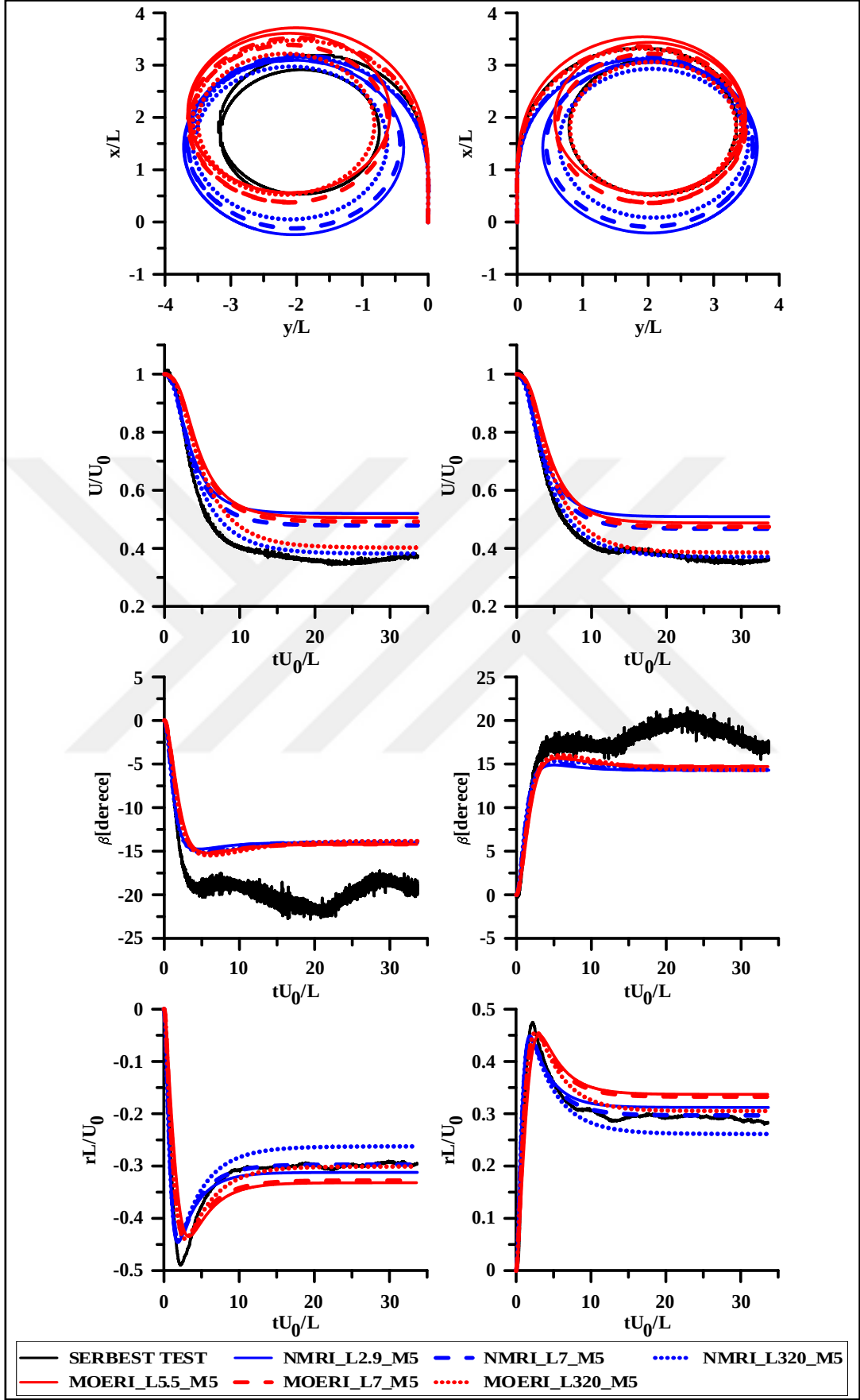
Şekil 60. Dönme manevraları-KVLCC1-MODEL 6 ($\delta=-35^\circ/35^\circ$)



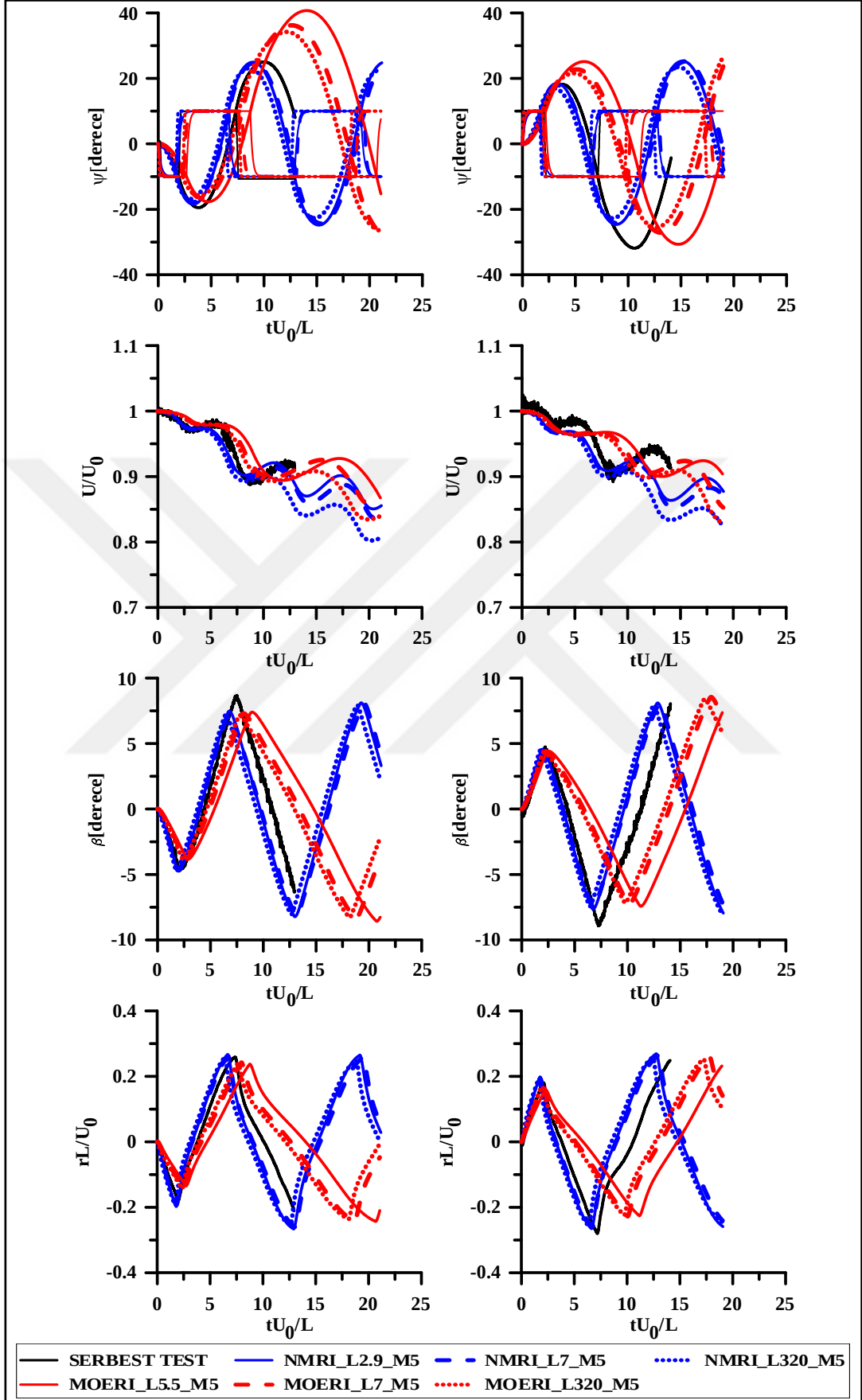
Şekil 61. Zigzag manevraları-KVLCC1-MODEL 6 ($\delta = -10^\circ/10^\circ$ & $10^\circ/-10^\circ$)



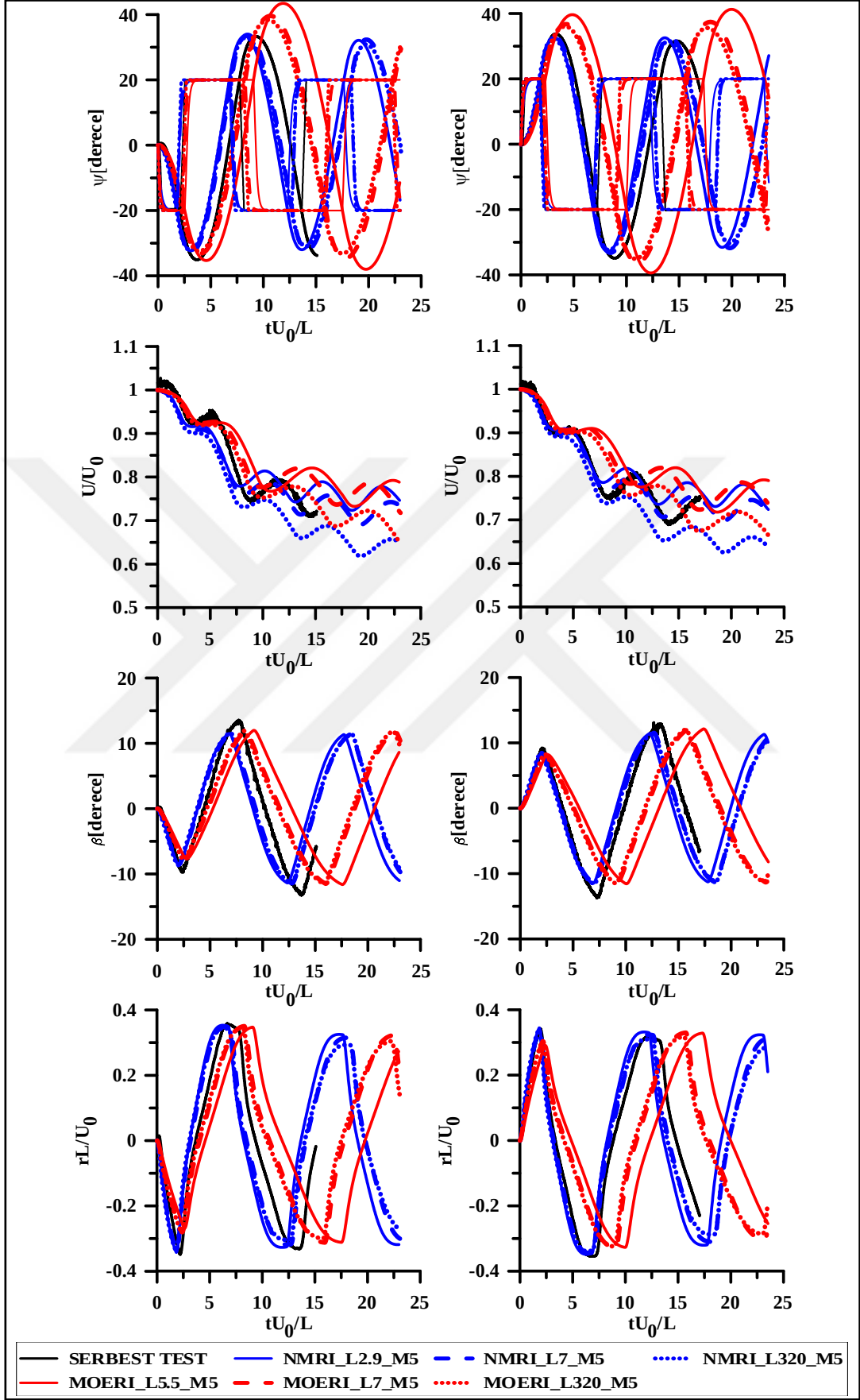
Şekil 62. Zigzag manevraları-KVLCC1-MODEL 6 ($\delta=-20^\circ/20^\circ$ & $20^\circ/-20^\circ$)



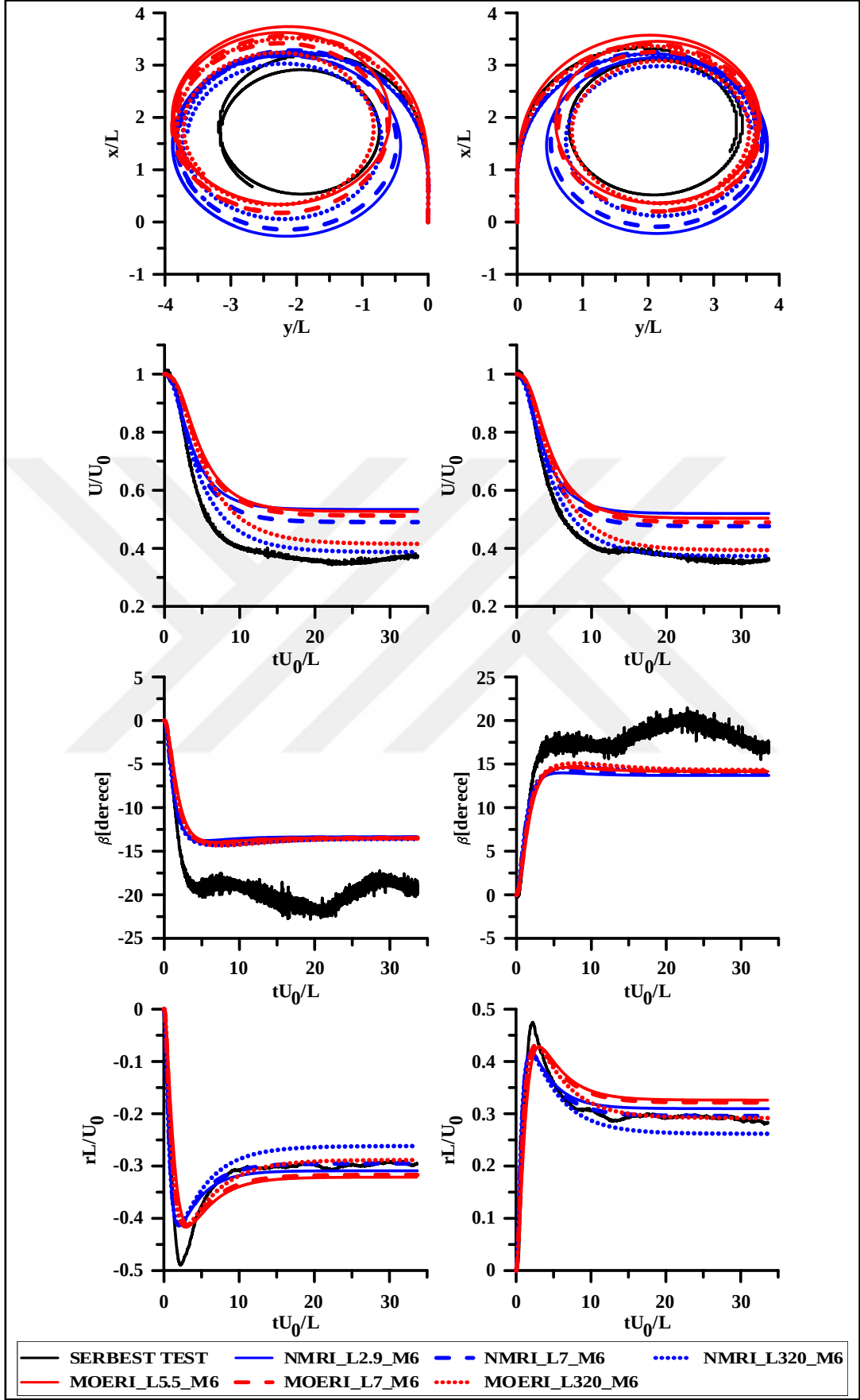
Şekil 63. Dönme manevraları-KVLCC2-MODEL 5 ($\delta=-35^\circ/35^\circ$)



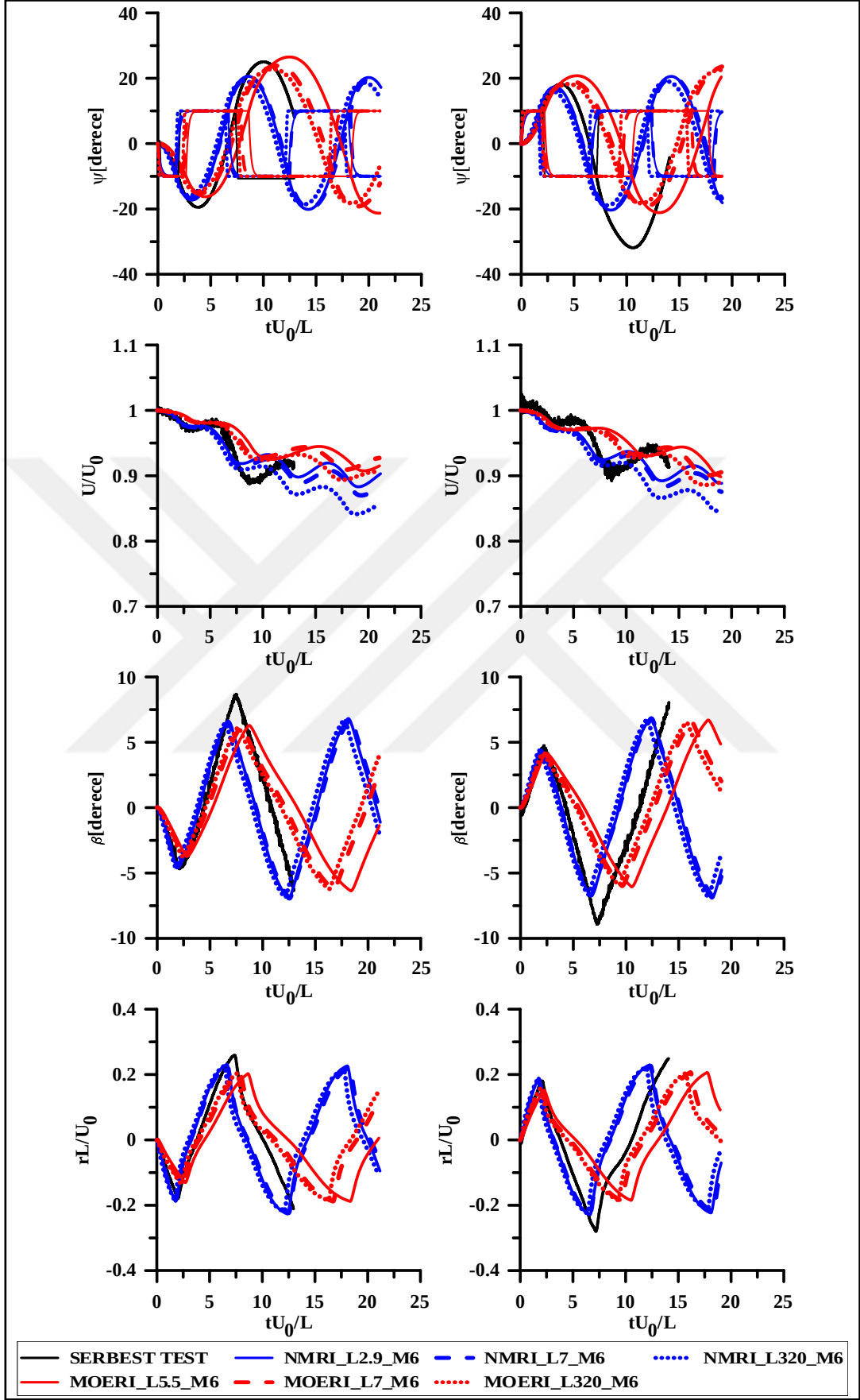
Şekil 64. Zigzag manevraları-KVLCC2-MODEL 5 ($\delta=-10^\circ/10^\circ$ & $10^\circ/-10^\circ$)



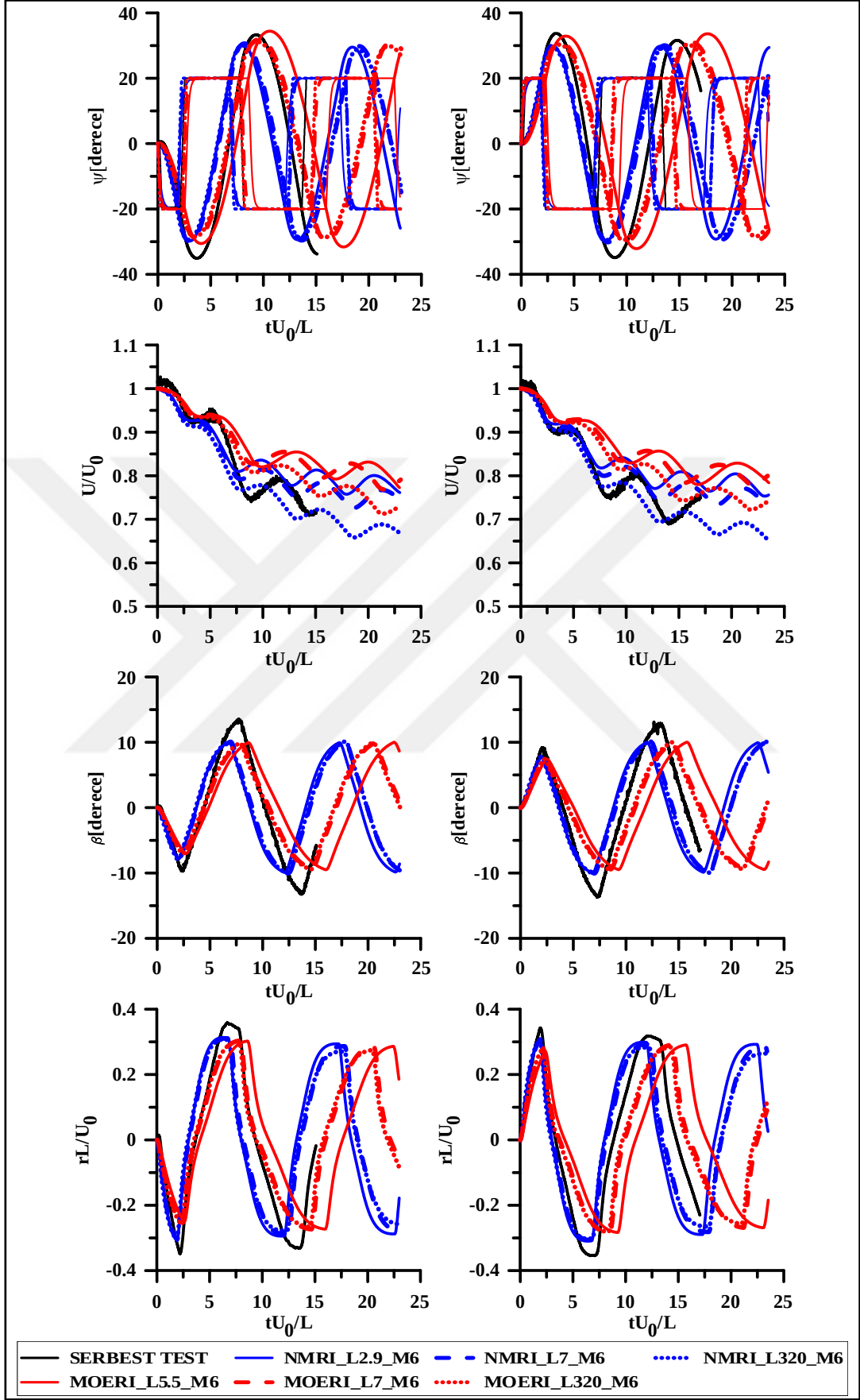
Şekil 65. Zigzag manevraları-KVLCC2-MODEL 5 ($\delta = -20^\circ/20^\circ$ & $20^\circ/-20^\circ$)



Şekil 66. Dönme manevraları-KVLCC2-MODEL 6 ($\delta = -35^\circ/35^\circ$)



Şekil 67. Zigzag manevraları-KVLCC2-MODEL 6 ($\delta=-10^\circ/10^\circ$ & $10^\circ/-10^\circ$)



Şekil 68. Zigzag manevraları-KVLCC2-MODEL 6 ($\delta=-20^\circ/20^\circ&20^\circ/-20^\circ$)

KVLCC1 teknesi için Tablo 47,48’de Model 5’in, Tablo 49,50’de Model 6’nın, KVLCC2 teknesi için ise Tablo 51,52’de Model 5’in, Tablo 53,54’te Model 6’nın dönme manevra indeksleri olan ilerleme, transfer ve taktik çap ile zigzag manevraları indeksleri olan birinci ve ikinci aşırı dönme açısı verilmiştir.

Tablo 47. KVLCC1-MODEL 5 için dönme manevrası indeksleri

KVLCC1-MODEL 5								
Sim.	İndeks	Serbest Test	NMRI L2.9	NMRI L7	NMRI L320	MOERI L5.5	MOERI L7	MOERI L320
Dönme man. ($\delta=35^\circ$)	A _D	3.28	2.94	2.97	2.93	3.26	3.00	2.96
	D _T	3.28	3.28	3.23	3.15	2.82	2.83	2.76
	T _R	1.30	1.26	1.24	1.22	1.12	1.10	1.09
Dönme man. ($\delta=-35^\circ$)	A _D	3.19	2.97	3.00	2.96	3.41	3.15	3.10
	D _T	3.07	3.31	3.26	3.18	2.94	2.95	2.89
	T _R	1.17	1.26	1.24	1.22	1.17	1.15	1.14

Tablo 48. KVLCC1-MODEL 5 için zigzag manevrası indeksleri

KVLCC1-MODEL 5								
Sim.	İndeks (OSA)	Serbest Test	NMRI L2.9	NMRI L7	NMRI L320	MOERI L5.5	MOERI L7	MOERI L320
Zigzag man. ($10^\circ/-10^\circ$)	1 st	8.4	8.85	8.03	7.12	18.77	15.79	14.30
	2 nd	19.6	18.00	17.75	16.00	30.39	24.89	22.84
Zigzag man. ($-10^\circ/10^\circ$)	1 st	10	10.57	9.68	8.48	10.33	8.38	7.60
	2 nd	16.1	16.92	16.36	14.70	42.06	35.02	32.63
Zigzag man. ($20^\circ/-20^\circ$)	1 st	13.9	14.07	14.27	13.74	25.04	21.27	20.56
	2 nd	15.5	14.39	14.84	13.78	25.63	20.42	19.20
Zigzag man. ($-20^\circ/20^\circ$)	1 st	15.4	14.09	14.74	13.99	20.29	17.14	16.40
	2 nd	13.2	14.59	15.25	14.32	30.49	24.60	23.18

Tablo 49. KVLCC1-MODEL 6 için dönme manevrası indeksleri

KVLCC1-MODEL 6								
Sim.	İndeks	Serbest Test	NMRI L2.9	NMRI L7	NMRI L320	MOERI L5.5	MOERI L7	MOERI L320
Dönme man. ($\delta=35^\circ$)	A _D	3.28	2.87	2.89	2.86	3.16	2.93	2.90
	D _T	3.28	3.03	2.96	2.87	2.72	2.74	2.67
	T _R	1.30	1.15	1.13	1.11	1.03	1.03	1.01
Dönme man. ($\delta=-35^\circ$)	A _D	3.19	2.89	2.92	2.88	3.30	3.06	3.02
	D _T	3.07	3.05	2.98	2.89	2.84	2.86	2.79
	T _R	1.17	1.14	1.12	1.10	1.08	1.07	1.06

Tablo 50. KVLCC1-MODEL 6 için zigzag manevrası indeksleri

KVLCC1-MODEL 6								
Sim.	İndeks (OSA)	Serbest Test	NMRI L2.9	NMRI L7	NMRI L320	MOERI L5.5	MOERI L7	MOERI L320
Zigzag man. (10°/-10°)	1 st	8.4	8.46	8.01	7.08	17.46	14.68	13.63
	2 nd	19.6	13.67	13.41	12.20	20.56	16.89	15.71
Zigzag man. (-10°/10°)	1 st	10	9.63	8.98	8.00	10.89	8.87	8.11
	2 nd	16.1	13.06	12.84	11.57	27.92	23.59	22.26
Zigzag man. (20°/-20°)	1 st	13.9	11.76	12.25	11.75	19.95	16.61	16.05
	2 nd	15.5	11.95	12.53	11.67	18.74	14.99	14.08
Zigzag man. (-20°/20°)	1 st	15.4	12.25	12.32	11.83	16.70	13.91	13.44
	2 nd	13.2	12.35	12.81	12.07	21.82	17.55	16.65

Tablo 51. KVLCC2-MODEL 5 için dönme manevrası indeksleri

KVLCC2-MODEL 5								
Sim.	İndeks	Serbest Test	NMRI L2.9	NMRI L7	NMRI L320	MOERI L5.5	MOERI L7	MOERI L320
Dönme man. ($\delta=35^\circ$)	A_D	3.25	3.06	3.09	3.06	3.48	3.30	3.26
	D_T	3.34	3.61	3.56	3.48	3.43	3.43	3.36
	T_R	1.36	1.49	1.48	1.46	1.47	1.46	1.44
Dönme man. ($\delta=-35^\circ$)	A_D	3.11	3.10	3.13	3.09	3.65	3.46	3.42
	D_T	3.08	3.66	3.61	3.53	3.60	3.60	3.52
	T_R	1.22	1.51	1.49	1.48	1.55	1.54	1.52

Tablo 52. KVLCC2-MODEL 5 için zigzag manevrası indeksleri

KVLCC2-MODEL 5								
Sim.	İndeks (OSA)	Serbest Test	NMRI L2.9	NMRI L7	NMRI L320	MOERI L5.5	MOERI L7	MOERI L320
Zigzag man. ($10^\circ/-10^\circ$)	1 st	8.2	8.49	7.93	6.88	15.12	12.73	11.56
	2 nd	21.9	14.61	14.32	12.75	20.69	17.16	15.49
Zigzag man. ($-10^\circ/10^\circ$)	1 st	9.5	8.43	7.82	6.84	7.68	6.58	5.77
	2 nd	15	14.94	14.68	13.12	30.70	26.20	24.20
Zigzag man. ($20^\circ/-20^\circ$)	1 st	13.7	12.76	12.92	12.39	19.63	16.72	16.05
	2 nd	14.9	12.82	13.21	12.44	19.39	16.18	15.06
Zigzag man. ($-20^\circ/20^\circ$)	1 st	15.1	12.35	12.70	12.16	15.31	13.13	12.51
	2 nd	13.3	13.40	13.79	13.00	23.43	19.58	18.37

Tablo 53. KVLCC2-MODEL 6 için dönme manevrası indeksleri

KVLCC2-MODEL 6								
Sim.	İndeks	Serbest Test	NMRI L2.9	NMRI L7	NMRI L320	MOERI L5.5	MOERI L7	MOERI L320
Dönme man. ($\delta=35^\circ$)	A_D	3.25	3.17	3.19	3.15	3.52	3.35	3.31
	D_T	3.34	3.77	3.71	3.61	3.65	3.66	3.58
	T_R	1.36	1.60	1.58	1.56	1.59	1.58	1.56
Dönme man. ($\delta=-35^\circ$)	A_D	3.11	3.20	3.23	3.19	3.68	3.51	3.46
	D_T	3.08	3.84	3.78	3.68	3.84	3.84	3.76
	T_R	1.22	1.62	1.60	1.58	1.68	1.67	1.65

Tablo 54. KVLCC2-MODEL 6 için zigzag manevrası indeksleri

KVLCC2-MODEL 6								
Sim.	İndeks (OSA)	Serbest Test	NMRI L2.9	NMRI L7	NMRI L320	MOERI L5.5	MOERI L7	MOERI L320
Zigzag man. ($10^\circ/-10^\circ$)	1 st	8.2	7.34	6.75	5.98	10.77	9.11	8.23
	2 nd	21.9	10.35	9.93	8.91	11.14	9.15	8.23
Zigzag man. ($-10^\circ/10^\circ$)	1 st	9.5	7.27	6.73	5.92	6.25	5.20	4.63
	2 nd	15	10.57	10.26	9.17	16.51	13.82	12.82
Zigzag man. ($20^\circ/-20^\circ$)	1 st	13.7	9.83	10.19	9.61	12.89	10.87	10.29
	2 nd	14.9	9.91	10.16	9.61	12.14	10.04	9.45
Zigzag man. ($-20^\circ/20^\circ$)	1 st	15.1	9.82	10.01	9.45	10.57	8.90	8.50
	2 nd	13.3	10.24	10.60	10.00	14.41	11.85	11.21

2.2.6. Sistem Tanımlama Uygulaması

KVLCC1 ve KVLCC2 tekneleri için MMG, Abkowitz ve Blanke modelleriyle deneysel verilerden elde edilen hidro dinamik katsayılar ve ilgili parametreler kullanılarak dönme ve zigzag manevralarının simülasyonları gerçekleştirildi. Bu simülasyonların incelenmesi neticesinde dönme ve zigzag manevralarının gerçek değerlerle uyumu özellikle tam ölçekli tekneler için oldukça güçtür. Bu uyumsuzluğu gidermek adına sistem

tanımlama metotlarından gri kutu yaklaşımı ile hidrodinamik katsayılar ve ilgili parametreler yeniden hesap edilmiştir.

Sistem tanımlama uygulamasında öncelikli olarak veri takımları hazırlanmıştır. Bu veriler serbest deneylerin yapıldığı modelin tam ölçekli tekneye uyarlanmış verileridir. Sistem tanımlamada yapılan denemeler neticesinde sancak, zigzag $-20^{\circ}/20^{\circ}$ ve zigzag $20^{\circ}/-20^{\circ}$ için yapılan manevra verilerinde karar kılınmıştır. Yanal kuvvet ve savrulma momentine ait katsayıların yeniden hesaplanması için teknenin ileri hızı ve dümen açısı sisteme girdi olarak, yanal hız ve savrulma hızı ise sisteme çıktı olarak tanıtılmıştır. Böylece MMG ve Abkowitz modelinde yer alan aşağıdaki katsayılar yeniden hesaplanmıştır:

MMG modeli için parametreler:

$$Y_v', Y_r' - m_x', Y_{vvv}', Y_{rrr}', Y_{vvr}', Y_{vrr}', Y_{|v|v}', Y_{|v|r}', Y_{|r|v}', Y_{|r|r}'$$

$$N_v', N_r', N_{vvv}', N_{rrr}', N_{vvr}', N_{vrr}', N_{|v|v}', N_{|v|r}', N_{|r|v}', N_{|r|r}'$$

Abkowitz modeli için parametreler:

$$Y^{0'}, Y_u^{0'}, Y_v', Y_r', Y_{\delta}', Y_{uv}', Y_{ur}', Y_{u\delta}', Y_{vvv}', Y_{rrr}', Y_{\delta\delta\delta}'$$

$$Y_{vvr}', Y_{vv\delta}', Y_{vrr}', Y_{v\delta\delta}', Y_{r\delta\delta}', Y_{rr\delta}', Y_{|v|v}', Y_{|v|r}', Y_{|\delta|\delta}', Y_{|\delta|r}'$$

$$Y_{|r|v}', Y_{|v|\delta}', Y_{|\delta|v}', Y_{|r|\delta}', Y_{|\delta|r}'$$

$$N^{0'}, N_u^{0'}, N_v', N_r', N_{\delta}', N_{uv}', N_{ur}', N_{u\delta}', N_{vvv}', N_{rrr}', N_{\delta\delta\delta}'$$

$$N_{vvr}', N_{vv\delta}', N_{vrr}', N_{v\delta\delta}', N_{r\delta\delta}', N_{rr\delta}', N_{|v|v}', N_{|v|r}', N_{|\delta|\delta}', N_{|\delta|r}'$$

$$N_{|r|v}', N_{|v|\delta}', N_{|\delta|v}', N_{|r|\delta}', N_{|\delta|r}'$$

Sistem tanımlamada algoritmaların yalnızca sonucu doğrulayacak bir katsayı üretmelerinden dolayı deneysel verilerle elde edilmiş parametreler için %5,%10 ve %20 aralıklarında bir katsayı üretmesi sağlanmıştır. Böylece yeni hesap edilecek olan katsayıların fiziksel olarak bir karşılığı olmuştur. Ayrıca simülasyonlarda atalet ile ilgili katsayılar ve boyuna kuvvete ait olan hidrodinamik katsayılar ve ilgili parametreler için MOERI'ya göre hesap edilmiş değerler dikkate alınmıştır. Tablo 55,56'da MMG modelindeki katsayılar ve parametreler, Tablo 57,58'de Abkowitz modelindeki katsayıların

yeni değerleri verilmiştir. Ayrıca hidrodinamik katsayıların tahmini için Matlab 2012a’da güven-gölgesi yansıtıcı Newton yöntemi (lsqnonlin) çözüm algoritması kullanılmıştır.

Tablo 55. MMG modelindeki yeniden hesaplanmış hidrodinamik katsayılar

MODEL1			MODEL2		
	KVLCC1	KVLCC2		KVLCC1	KVLCC2
Y_v'	-0.2957	-0.2982	Y_v'	-0.1548	-0.1792
$Y_r' - m_x'$	0.0488	0.0577	$Y_r' - m_x'$	0.0394	0.0485
Y_{vvv}'	-1.2390	-1.6680	$Y_{ v v}'$	-0.9175	-0.9081
Y_{rrr}'	0.0255	0.0075	$Y_{ v r}'$	0.0665	0.0670
Y_{vvr}'	0.4151	0.3835	$Y_{ r v}'$	-0.2680	-0.2950
Y_{vrr}'	-0.3857	-0.4111	$Y_{ r r}'$	0.0209	0.0186
N_v'	-0.1319	-0.1440	N_v'	-0.1425	-0.1577
N_r'	-0.0462	-0.0462	N_r'	-0.0395	-0.0401
N_{vvv}'	0.0917	-0.0296	$N_{ v v}'$	0.0476	0.0312
N_{rrr}'	0.0019	-0.0118	$N_{ v r}'$	-0.0584	-0.0680
N_{vvr}'	-0.2819	-0.3048	$N_{ r v}'$	0.0504	0.0481
N_{vrr}'	0.0178	0.0530	$N_{ r r}'$	-0.0116	-0.0143

Tablo 56.Dümen ile ilgili yeniden hesaplanmış katsayılar

	KVLCC1	KVLCC2
a_H	0.471	0.458
x_H'	-0.447	-0.400
ϵ	1.156	1.176
k	0.479	0.520
l_R'	-0.718	-0.673
$\gamma_R(\beta_R < 0)$	0.404	0.417
$\gamma_R(\beta_R > 0)$	0.555	0.611

Tablo 57. Abkowitz modelindeki yeniden hesaplanmış Y ile ilgili hidrodinamik katsayılar

MODEL3			MODEL4		
	KVLCC1	KVLCC2		KVLCC1	KVLCC2
$Y^{0'}$	0.0033	0.0010	$Y^{0'}$	0.0033	0.0010
Y_v'	-0.3393	-0.3138	Y_v'	-0.2215	-0.2231
Y_{vvv}'	-1.7785	-2.1669	$Y_{ v v}'$	-0.8554	-0.7437
Y_r'	0.0650	0.0707	Y_r'	0.0658	0.0780
Y_{rr}'	0.0367	0.0090	$Y_{ r r}'$	0.0409	0.0092
Y_δ'	0.0572	0.0608	Y_δ'	0.0575	0.0600
$Y_{\delta\delta\delta}'$	-0.0103	-0.0106	$Y_{ \delta \delta}'$	-0.0062	-0.0044
Y_{vvr}'	0.5131	0.3616	$Y_{ v r}'$	0.1086	0.0802
Y_{vrr}'	-0.4302	-0.3243	$Y_{ r v}'$	-0.3385	-0.2909
$Y_{vv\delta}'$	0.0958	-0.0049	$Y_{ v \delta}'$	0.0188	-0.0149
$Y_{v\delta\delta}'$	-0.0181	-0.0240	$Y_{ \delta v}'$	0.0077	0.0104
$Y_u^{0'}$	0.0024	0.0026	$Y_u^{0'}$	0.0024	0.0026
Y_{uv}'	0.0416	0.0198	Y_{uv}'	0.0416	0.0198
Y_{ur}'	-0.0352	-0.0356	Y_{ur}'	-0.0352	-0.0356
$Y_{u\delta}'$	-0.0574	-0.0720	$Y_{u\delta}'$	-0.0574	-0.0720
$Y_{r\delta\delta}'$	-0.0882	-0.0140	$Y_{ r \delta}'$	0.1129	0.0126
$Y_{rr\delta}'$	0.1464	0.0119	$Y_{ \delta r}'$	-0.0792	-0.0050

Tablo 58. Abkowitz modelindeki yeniden hesaplanmış N ile ilgili hidrodinamik katsayılar

MODEL3			MODEL4		
	KVLCC1	KVLCC2		KVLCC1	KVLCC2
$N^{0'}$	0.0003	0.0003	$N^{0'}$	0.0003	0.0003
N_v'	-0.1311	-0.1089	N_v'	-0.1422	-0.1463
N_{vvv}'	0.0232	0.0836	$N_{ v v}'$	0.0112	0.0289
N_r'	-0.0571	-0.0478	N_r'	-0.0594	-0.0501
N_{rr}'	-0.0149	-0.0103	$N_{ r r}'$	-0.0163	-0.0126
N_δ'	-0.0276	-0.0249	N_δ'	-0.0280	-0.0324
$N_{\delta\delta\delta}'$	0.0079	0.0122	$N_{ \delta \delta}'$	0.0052	0.0082
N_{vvr}'	-0.3506	-0.2631	$N_{ v r}'$	-0.0832	-0.0711
N_{vrr}'	0.0718	0.0498	$N_{ r v}'$	0.0665	0.0516
$N_{vv\delta}'$	-0.0177	-0.0073	$N_{ v \delta}'$	-0.0066	-0.0044
$N_{v\delta\delta}'$	-0.0008	0.0082	$N_{ \delta v}'$	-0.0017	0.0043
$N_u^{0'}$	-0.0004	-0.0002	$N_u^{0'}$	-0.0004	-0.0002
N_{uv}'	-0.0123	-0.0216	N_{uv}'	-0.0123	-0.0216
N_{ur}'	-0.0058	-0.0020	N_{ur}'	-0.0058	-0.0020
$N_{u\delta}'$	0.0314	0.0339	$N_{u\delta}'$	0.0314	0.0339
$N_{r\delta\delta}'$	0.0029	0.0038	$N_{ r \delta}'$	-0.0105	-0.0069
$N_{rr\delta}'$	-0.0075	-0.0022	$N_{ \delta r}'$	0.0025	-0.0002

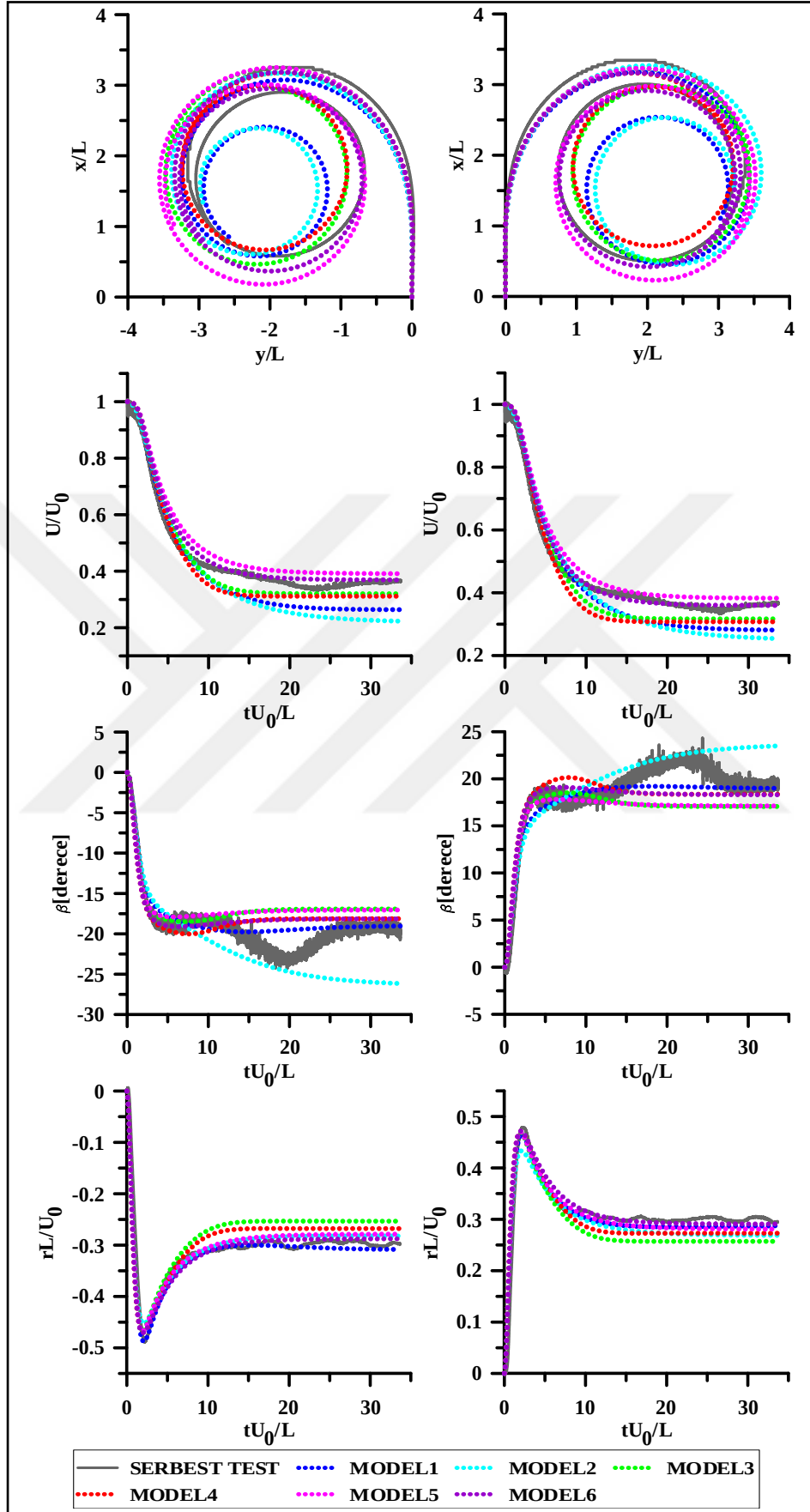
Sistem tanımlama ile elde ettiğimiz yeni katsayılar ile oluşturmuş olduğumuz matematiksel modeller dönme ve zigzag manevraları için simüle edildi. KVLCC1 teknesi için Şekil 69,70,71’de, KVLCC2 teknesi için Şekil 72,73,34’de bütün modellerin uygulamaları verilmiştir.

KVLCC1 teknesinin simülasyonlarını incelediğimizde, sancak için dönme manevrasında yörünge eğrisi açısından en iyi uyum Model 3 ile elde etmekle birlikte teknenin takip ettiği yörünge özellikle simülasyonların başında birbirleriyle yakın sonuç vermektedir. İskele için dönme manevrasını incelediğimizde uyumun Model 4 ile elde edilmesiyle birlikte sancak için dönme manevrasında durumla benzerlik göstermektedir. Zigzag $\pm 10^\circ/\pm 10^\circ$ manevralarını incelediğimizde özellikle Model 2 gerçek değerler uyum

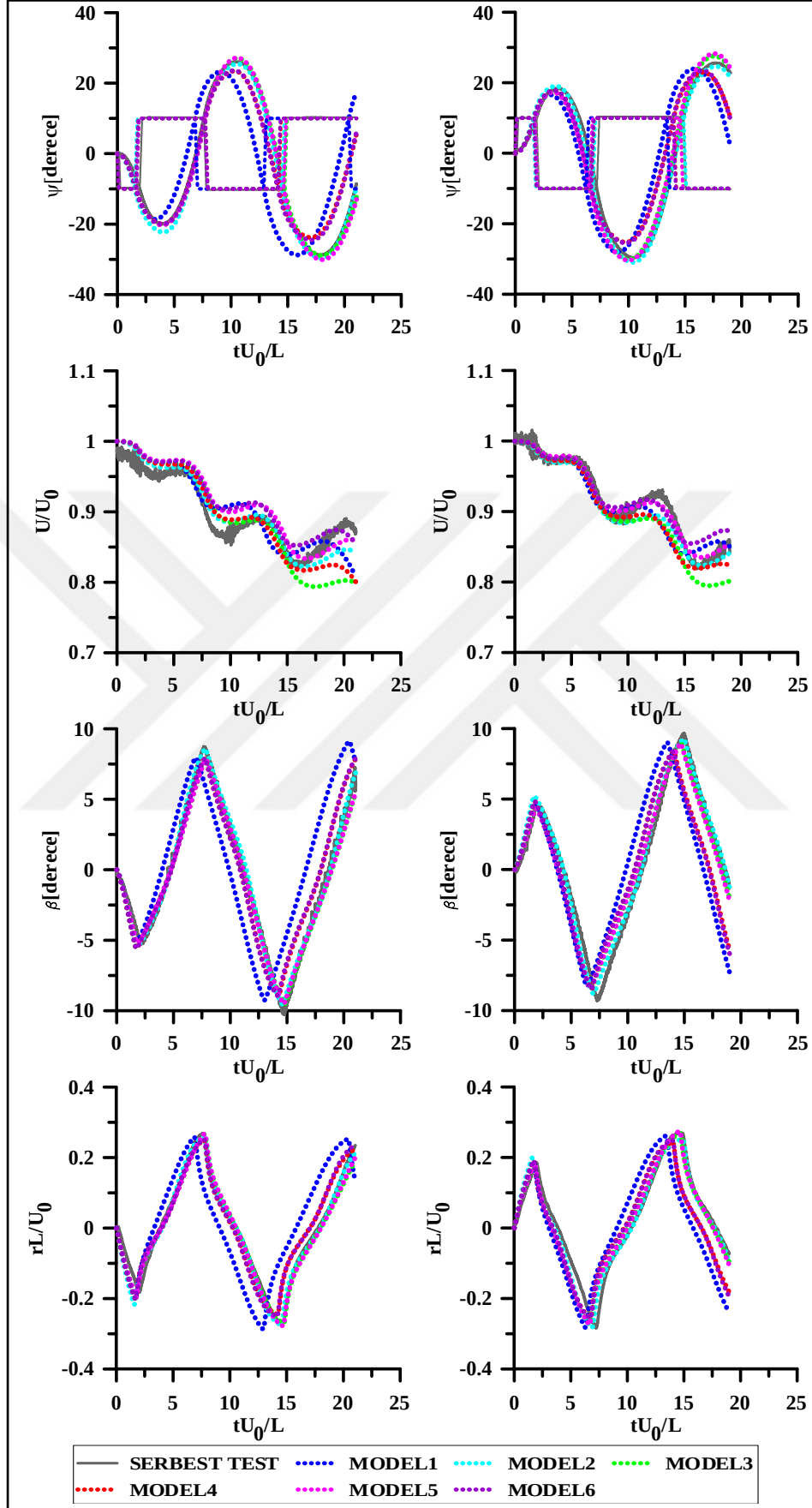
sağlamakla birlikte Model 3 ve Model 5'in uyumları da oldukça iyidir. Zigzag $\pm 10^\circ/\pm 10^\circ$ manevralarındaki durumun benzeri Zigzag $\pm 20^\circ/\pm 20^\circ$ manevralarında da görülmektedir.

KVLCC2 teknesinin simülasyonlarını incelediğimizde, sancak için dönme manevrasında en iyi uyum KVLCC1 teknesinde olduğu gibi Model 3 ile elde edilmiştir. İskele dönme manevrasında Model 1 için uyumun iyi olduğunu söyleyebiliriz. Zigzag $\pm 10^\circ/\pm 10^\circ$ manevralarını incelediğimizde genel bir durum oluşmasa da Model 2'nin uyumunun iyi olduğunu varsayabiliriz. Zigzag $\pm 20^\circ/\pm 20^\circ$ manevralarında ise Model 2 ve Model 5 için uyum diğerlerine göre daha iyidir.

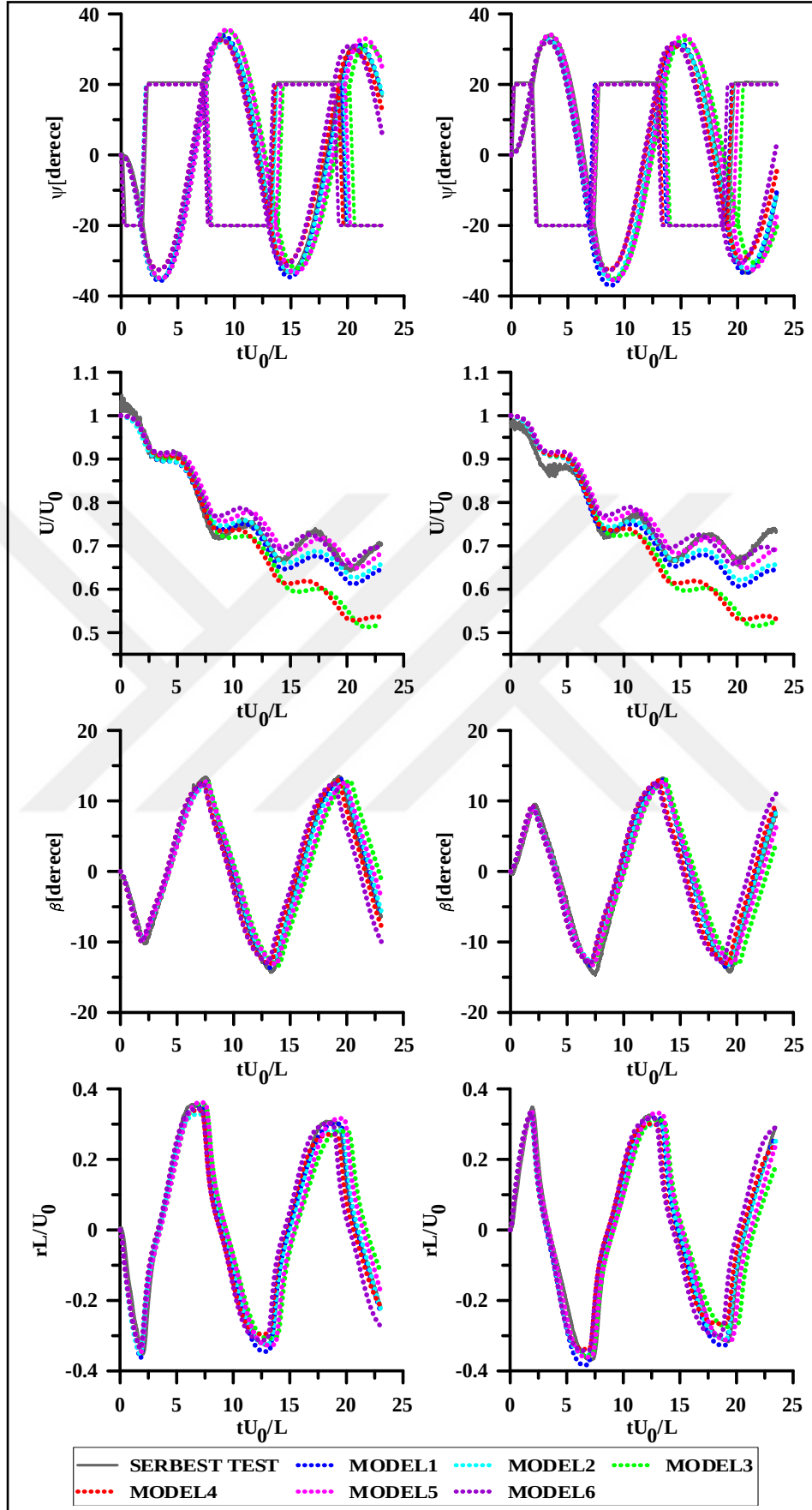
Hem KVLCC1 hem de KVLCC2 tekneleri için deneysel verilerle elde edilmiş hidrodinamik katsayılar ve parametreler kullanılarak simüle edilmiş matematiksel modellerin tam ölçekli tekne uygulamaları sistem tanımlama yöntemiyle elde edilen yeni katsayılar ile iyileştirilmiştir. Özellikle bütün manevra çeşitleri göz önüne alındığında bu iyileştirme görülmektedir.



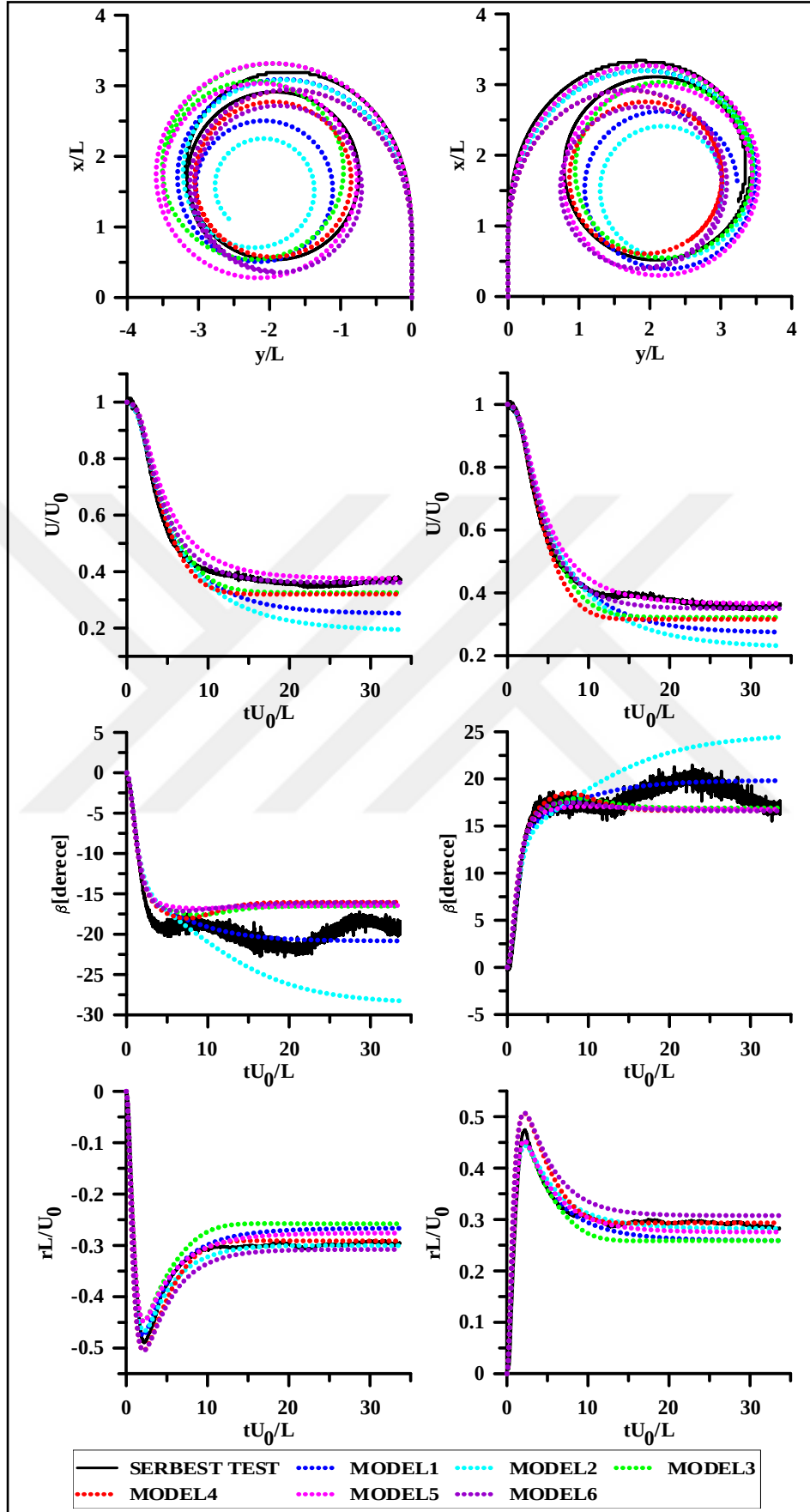
Şekil 69. Dönme manevraları-KVLCC1 ($\delta=-35^\circ/35^\circ$)



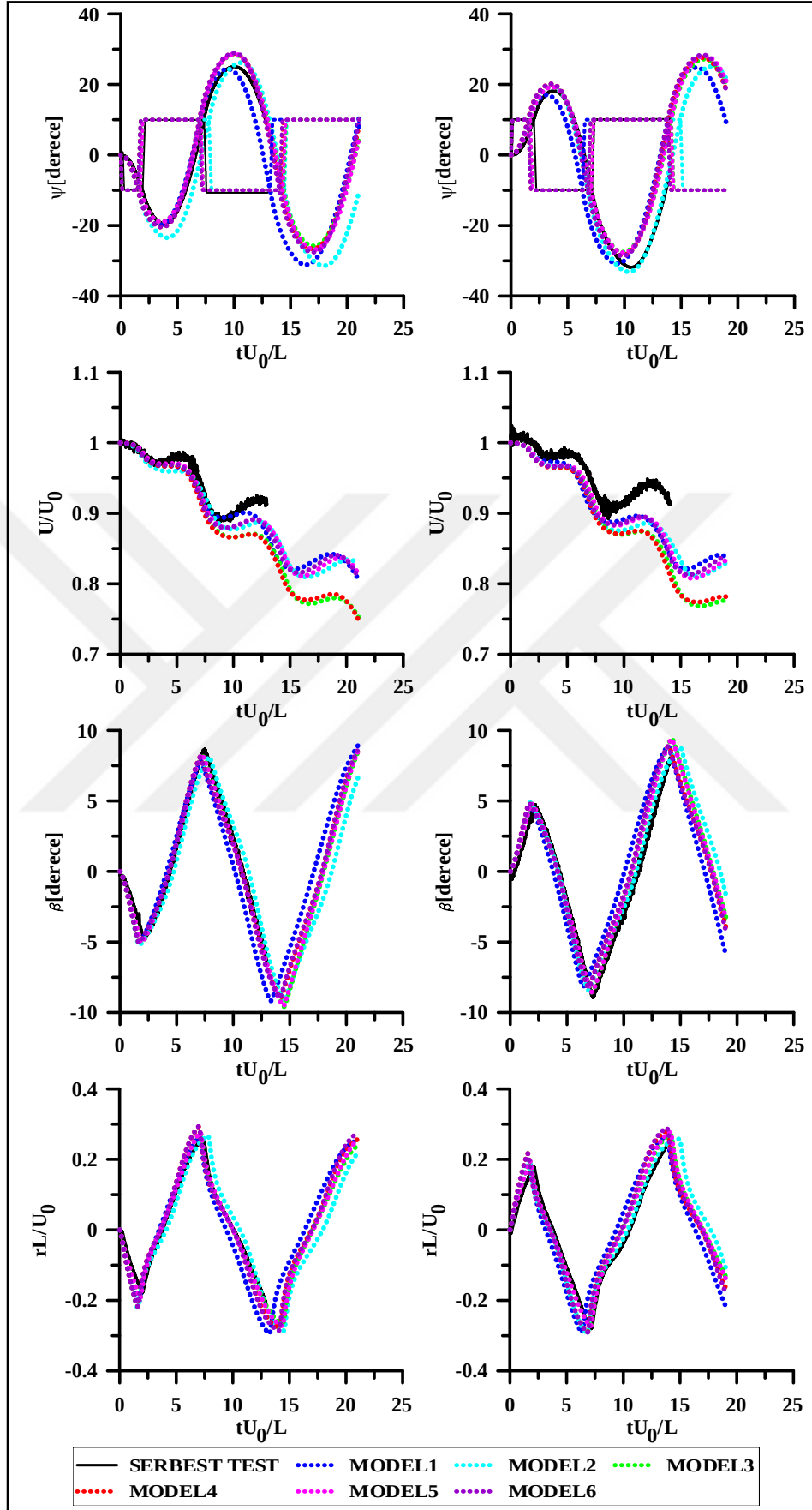
Şekil 70. Zigzag manevraları-KVLCC1 ($\delta=-10^\circ/10^\circ$ & $10^\circ/-10^\circ$)



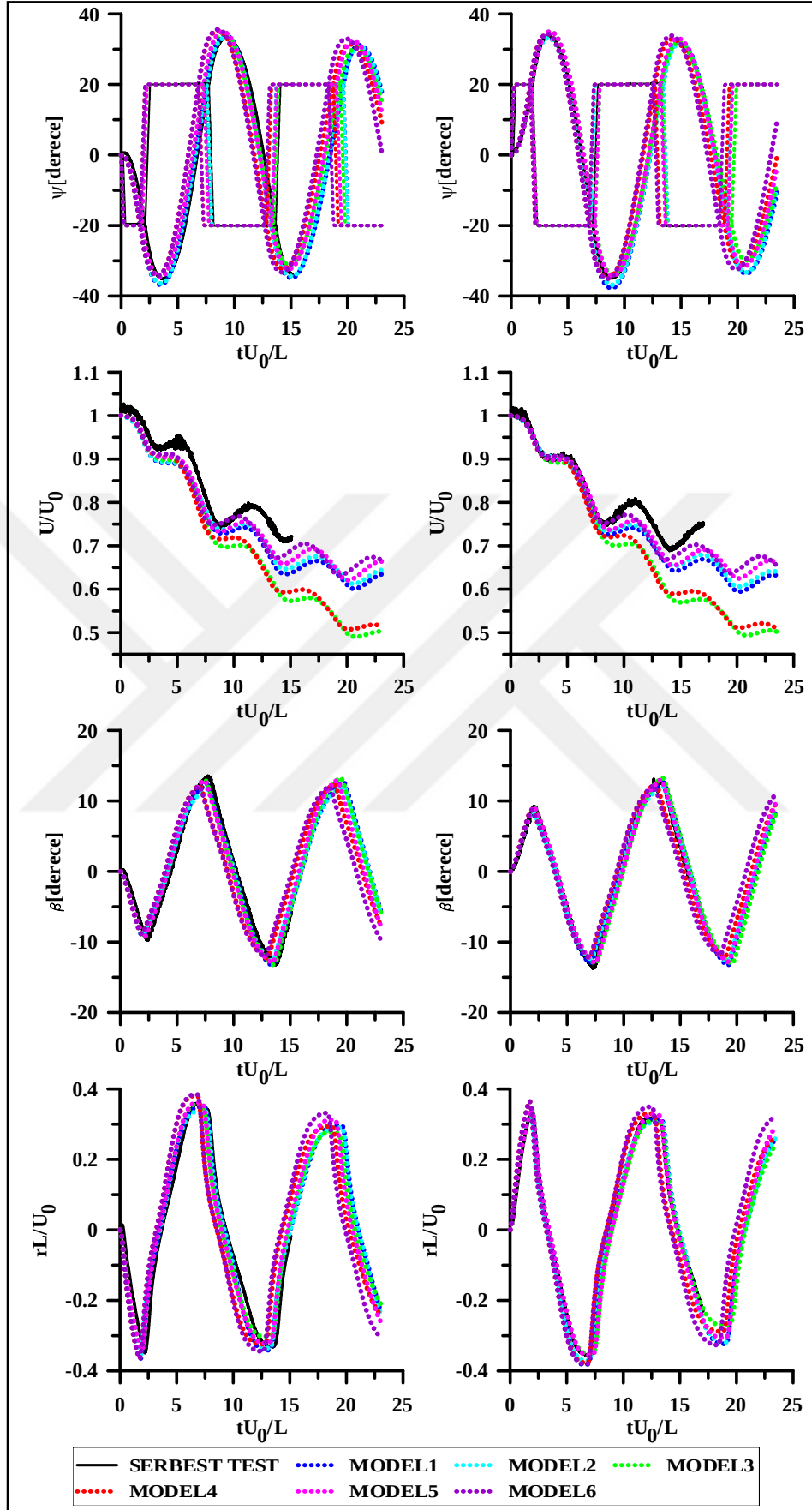
Şekil 71. Zigzag manevraları-KVLCC1 ($\delta=-20^\circ/20^\circ&20^\circ/-20^\circ$)



Şekil 72. Dönme manevraları-KVLCC2 ($\delta=-35^\circ/35^\circ$)



Şekil 73. Zigzag manevraları-KVLCC2 ($\delta = -10^\circ/10^\circ$ & $10^\circ/-10^\circ$)



Şekil 74. Zigzag manevraları-KVLCC2 ($\delta = -20^\circ/20^\circ$ & $20^\circ/-20^\circ$)

KVLCC1 teknesi için Tablo 59,60'ta KVLCC2 teknesi için ise Tablo 61,62'de dönme manevra indeksleri olan ilerleme, transfer ve taktik çap ile zigzag manevraları indeksleri olan birinci ve ikinci aşırı dönme açısı verilmiştir.

Tablo 59. KVLCC1 için dönme manevrası indeksleri

KVLCC1								
Sim.	İndeks	Serbest Test	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Dönme man. ($\delta=35^\circ$)	A_D	3.28	3.10	3.20	3.14	3.07	3.15	3.08
	D_T	3.28	3.36	3.52	3.36	3.13	3.45	3.24
	T_R	1.30	1.40	1.48	1.37	1.28	1.39	1.30
Dönme man. ($\delta=-35^\circ$)	A_D	3.19	3.00	3.09	3.16	3.09	3.16	3.10
	D_T	3.07	3.17	3.31	3.40	3.16	3.48	3.27
	T_R	1.17	1.31	1.39	1.37	1.28	1.38	1.29

Tablo 60. KVLCC1 için zigzag manevrası indeksleri

KVLCC1								
Sim.	İndeks (OSA)	Serbest Test	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Zigzag man. ($10^\circ/10^\circ$)	1 st	8.4	6.57	9.01	7.28	7.73	7.25	7.74
	2 nd	19.6	18.02	20.92	20.12	15.24	20.37	15.42
Zigzag man. ($-10^\circ/10^\circ$)	1 st	10	8.65	12.27	10.23	9.97	10.25	9.99
	2 nd	16.1	13.18	15.44	17.01	13.42	17.15	13.55
Zigzag man. ($20^\circ/20^\circ$)	1 st	13.9	12.91	12.60	14.08	12.06	14.09	12.07
	2 nd	15.5	17.06	15.33	15.12	12.47	15.51	12.72
Zigzag man. ($-20^\circ/20^\circ$)	1 st	15.4	15.73	15.13	15.05	12.54	15.03	12.57
	2 nd	13.2	13.89	12.60	15.19	12.56	15.54	12.76

Tablo 61. KVLCC2 için dönme manevrası indeksleri

KVLCC2								
Sim.	İndeks	Serbest Test	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Dönme man. ($\delta=35^\circ$)	A_D'	3.25	3.13	3.13	3.19	2.86	3.20	2.86
	D_T'	3.34	3.43	3.39	3.39	2.95	3.47	3.03
	T_R'	1.36	1.44	1.46	1.43	1.27	1.44	1.28
Dönme man. ($\delta=-35^\circ$)	A_D'	3.11	3.02	3.02	3.24	2.88	3.25	2.88
	D_T'	3.08	3.22	3.14	3.44	2.99	3.53	3.06
	T_R'	1.22	1.35	1.35	1.44	1.28	1.46	1.29

Tablo 62. KVLCC2 için zigzag manevrası indeksleri

KVLCC2								
Sim.	İndeks (OSA)	Serbest Test	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Zigzag man. ($10^\circ/-10^\circ$)	1 st	8.2	7.01	9.33	9.26	10.13	9.26	10.12
	2 nd	21.9	20.81	23.11	17.53	18.43	17.71	18.60
Zigzag man. ($-10^\circ/10^\circ$)	1 st	9.5	9.85	13.45	9.01	10.43	9.01	10.43
	2 nd	15	14.36	16.15	18.47	18.77	18.60	18.89
Zigzag man. ($20^\circ/-20^\circ$)	1 st	13.7	13.32	13.23	14.98	14.30	14.99	14.30
	2 nd	14.9	17.73	16.83	13.84	14.83	14.24	15.09
Zigzag man. ($-20^\circ/20^\circ$)	1 st	15.1	16.77	16.45	14.55	14.20	14.56	14.20
	2 nd	13.3	14.00	13.31	14.58	15.33	14.97	15.56

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Sunulan tez çalışmasında tankerlerin manevra performanslarının belirlenmesi için üç serbestlik dereceli matematiksel modellerdeki hidrodinamik katsayılar ve ilgili parametreler deneysel ve sistem tanımlama metotlarından birisi olan gri kutu yaklaşımıyla hesap edilerek gerçekleştirilmiş simülasyonlar serbest model deney verileri ile kıyaslanmıştır. Karşılaştırma tutsak model deneylerinin yapıldığı modelin yanı sıra serbest deneylerin yapıldığı model ve tam ölçekli tekne boyutlarında yapılarak ölçek etkisi incelenmiştir. Matematiksel model olarak MMG, Abkowitz ve Blanke modelleri değerlendirilmiştir. Bu modellerden MMG fiziksel olarak tekne, dümen ve pervane ilişkilerinin belirlenmesi açısından etkilidir. Abkowitz modelinde ise teknenin toplam kuvvet ve momentinin büyüklükleri belirlendiğinden MMG'deki durumdan bahsedemeyiz. Blanke modelinde ise aslında Abkowitz modeline benzer bir yapı kullanılarak yalnızca pervanenin itme kuvveti ve direnç kuvveti arasındaki ilişki hesaba katılarak manevra üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca bu matematiksel modellerde yer alan yanal kuvvet ve savrulma momenti ikinci ve üçüncü derece polinom ile temsil edilerek bu yönde de matematiksel modeller değerlendirilmiştir.

Sunulan tez çalışmasından elde edilen başlıca sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

1. İlk uygulamamız olan Mariner teknesinde iteratif çözüm algoritmasının kullanıldığı gri kutu yaklaşımının performansının belirlenmesi üzerine bir çalışma yapılmıştır. Bunun için öncelikli olarak duyarlılık analizi yapılarak matematiksel modeldeki hidrodinamik katsayıların etkileri tespit edilmiştir. Böylece matematiksel model belirli bir duyarlılık değerinin altındaki hidrodinamik katsayıların çıkartılmasıyla basitleştirilmiştir. Bu basitleştirilen matematiksel modellerin hidrodinamik katsayıları gri kutu yaklaşımıyla yeniden hesaplanmıştır. Burada simülasyon sonuçları büyük bir uyum gösterse de basitleştirilmiş matematiksel modellerdeki hidrodinamik katsayıların yeni tahminleri aslında gerçek değerlerin uzağındadır. Bu durum aslında fiziksel karşılıkları olan ve belirli bir aralıkta değişen bu katsayıların eksiltilmiş matematiksel modelde aralık dışına çıktığını göstermektedir. Ayrıca bu yaklaşımda parametrelerin başlangıç değerleri tahmin açısından oldukça önemlidir.

2. İkinci uygulamamız olan MMG modelinde tekne yanal kuvveti ve savrulma momenti ikinci ve üçüncü derece polinomla temsil edilmiştir. KVLCC1 teknesinin Model 1 ile gerçekleştirilen dönme manevralarına baktığımızda NMRI'nın $L=2.9091$ m ile yapılan simülasyon gerçek değerlerle oldukça uyumludur. Fakat NMRI'nın serbest testin yapıldığı tekne için olmasa da özellikle tam ölçekli boyuttaki tekne için simülasyon sonuçları gerçek değerlerden oldukça uzaklaşmaktadır. MOERI ile gerçekleştirdiğimiz Model 1 uygulamasında ise farklı tekne büyüklüğündeki simülasyonlarda farklılıklar olsa da benzer bir yörünge eğrileri oluşturduklarını ve bu eğrilerin gerçek değerler ile uyumlu olduğunu söyleyebiliriz. Model 2 için dönme manevralarında ise NMRI için Model 1 ile benzer durum oluşsa da MOERI da yörünge eğrileri Model 1'e göre gerçek değerlerden uzaklaşmaktadır. Zigzag $\pm 10^\circ/\pm 10^\circ$ manevralarında ise özellikle NMRI'nın $L=2.9091$ m için Model 1 ile gerçekleştirilen simülasyonun savrulma açısı eğrisi gerçek değerler oldukça uyumlu iken bu uyum NMRI simülasyonlarında tekne büyüklüğüyle birlikte gerçek değerlerden uzaklaşmaktadır. MOERI'da ise Model 1 ile gerçekleştirilen simülasyonlarda özellikle tam ölçekli teknenin savrulma açısı eğrisi gerçek değerlerin çok uzağındadır. Model 2 ile gerçekleştirilen hem NMRI hem de MOERI'ya ait simülasyon eğrileri Model 1 kadar başarılı değildir. Zigzag $\pm 20^\circ/\pm 20^\circ$ manevralarında ise Model 1 ile başarı NMRI için $L=2.9091$ m simülasyonu ile sağlanırken, Model 2 ile benzer başarı NMRI için $L=2.9091$ m ve MOERI için serbest deney modelinin yapıldığı $L=7$ m için yapılan simülasyonlarda sağlanmıştır. Sonuç olarak KVLCC1 teknesi için genel manada en iyi uyum NMRI'nın $L=2.9091$ m için tekne yanal kuvveti ve savrulma momenti üçüncü derece polinom ile ifade edildiği Model 1 ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca özellikle tam ölçekli tekne için dönme manevralarında sağlanan uyum zigzag manevralarında sağlanmazken zigzag manevralarında sağlanan uyum dönme manevralarında sağlanmamaktadır. KVLCC2 teknesi için MMG uygulamasında dönme manevralarında Model 1 ile gerçekleştirilen simülasyonlar KVLCC1 teknesinin Model 1 ile gerçekleştirilen simülasyonları ile benzerlik göstermektedir. Model 2 ile gerçekleştirilen dönme manevralarında ise özellikle MOERI ile yapılan simülasyon üç farklı büyüklükteki tekne için gerçek değerlerden oldukça uzaktır. Zigzag $\pm 10^\circ/\pm 10^\circ$ manevralarında ise NMRI $L=320$ m için olan simülasyon hariç Model 2 ile sağlanan uyum Model 1'e göre daha iyidir. Zigzag $\pm 20^\circ/\pm 20^\circ$ manevralarında NMRI için Model 1 ve Model 2'nin uyumları benzer iken MOERI'da uyum Model 2 ile iyileşmektedir. Sonuç olarak KVLCC2 teknesi için dönme manevralarında Model 1 ile zigzag manevralarında Model 2 ile sağlanan uyum başarılıdır. KVLCC1 teknesinde olduğu gibi tam ölçekli tekne için dönme ve zigzag manevraları bir arada başarılı bir şekilde gerçekleşmemiştir.

3. Üçüncüsü olan Abkowitz modeli uygulamasında toplam yanal kuvvet ve savrulma momenti ikinci ve üçüncü derece polinomla temsil edilmiştir. KVLCC1 teknesinin Model 3 ve Model 4 ile gerçekleştirilen dönme manevralarında her iki model benzer yörünge eğrileri oluşturmakta ve her iki model de gerçek değerlerle uyum göstermemektedir. Zigzag $\pm 10^\circ/\pm 10^\circ$ manevralarında ise NMRI'ya ait simülasyonların savrulma açısı eğrileri hem Model 3 hem de Model 4 için gerçek değerlere MOERI'ya göre daha yakın gözükmemektedir. Fakat her iki durum için modellerin uygunluğundan söz edilemez. Zigzag $\pm 20^\circ/\pm 20^\circ$ manevrasında ise MOERI'ya ait simülasyonlar için bir uyumdan söz edilemese de NMRI için üçüncü derece polinom ile temsil edilen yanal kuvvet ve savrulma momenti yaklaşımının daha uygun olduğunu söyleyebiliriz. Sonuç olarak KVLCC1 için Abkowitz modeli uygulamasında gerçek değerlerle uyum istenen düzeyde değildir. Ayrıca MMG modelinde olduğu gibi bütün simülasyonlarda uyumun sağlanamadığı ortadadır. KVLCC2 teknesi için ise dönme manevralarında yalnızca uyum sancak için dönme manevrasında MOERI için $L=7$ m ve $L=320$ m simülasyonlarında gerçekleşmiştir. NMRI için dönme manevralarında ise tekne olması gerektiğinden çok fazla bir dönme çapı oluşturmaktadır. Zigzag $\pm 10^\circ/\pm 10^\circ$ ve zigzag $\pm 20^\circ/\pm 20^\circ$ manevralarında MOERI'ya nispeten NMRI simülasyonlarında gerçek değerlerle uyum simülasyonun ilk zamanlarında sağlansa da savrulma açısı eğrisi gerçek değerlerle uyuşmamaktadır. KVLCC1 teknesinde olduğu gibi Abkowitz modeli KVLCC2 için de istenilen uyum sağlanamamıştır.

4. Dördüncü uygulama olan Blanke modeli uygulamasında Abkowitz modelindeki toplam yanal kuvvet ve savrulma momenti yaklaşımı aynı şekilde kullanılmıştır. Yalnızca pervane itmesi ve buna karşılık gelen direnç kuvveti hesaplamaya katılmıştır. Bu durum KVLCC1 teknesi için Model 5 ve Model 6 ile gerçekleştirilen dönme manevralarında Model 3 ve Model 4 ile gerçekleştirilen dönme manevralarına göre yörünge eğrileri açısından bir iyileştirme sağlamaktadır. Zigzag $\pm 10^\circ/\pm 10^\circ$ ve zigzag $\pm 20^\circ/\pm 20^\circ$ manevralarında ise herhangi bir değişim söz konusu değildir. Bu durum KVLCC2 teknesi için de gerçekleşmiştir. Çünkü dönme manevralarında hız düşüşü zigzag manevralarına göre daha büyüktür ve bu düşüşün dikkate alınması matematiksel modellerde gereklidir.

5. Tutsak model deneyleri olan doğrusal çekme, döner kol ve yatay düzlem mekanizma deneyleri verileri kullanılarak hesap edilen hidrodinamik katsayılar ve ilgili parametrelerin matematiksel modellerde kullanılması suretiyle özellikle dönme ve zigzag manevraları simüle edilmiştir. Dönme ve zigzag manevralarının simüle edildiği tez çalışmasında simülasyonlar neticesinde dönme ve zigzag manevralarının bir arada gerçek değerlere olabildiğince yakın özellikle tam ölçekli tekne için uygulanan modeller ile sağlanamamıştır. Sistem tanımlama yöntemlerinden birisi olan gri kutu yaklaşımıyla bu matematiksel modellerde yer alan

hidrodinamik katsayılar ve ilgili parametreler yeniden tahmin edilmiştir. Tahmin edilen bu katsayılar ile dönme ve zigzag manevraları tam ölçekli tekne için simüle edildiğinde simülasyonlar neticesinde genel bir iyileştirme hem KVLCC1 hem de KVLCC2 tekneleri için sağlanmıştır. KVLCC1 teknesi için dönme manevralarında özellikle Model 6 başta olmak üzere diğer modellerde gerçek yörünge eğrilerine uyumlu sayılabilir. Zigzag $\pm 10^\circ/\pm 10^\circ$ manevrasında Model 2, Model 3 ve Model 5 ile uyum sağlanırken Model 1, Model 4 ve Model 6 için istenen uyum gerçekleşmemiştir. Zigzag $\pm 20^\circ/\pm 20^\circ$ manevrasında başta Model 1 ve Model 2 olmak üzere diğer matematiksel modellerde gerçek değerlerle uyumludur. KVLCC2 teknesinin dönme manevrasında Model 1 başarılı sayılabilir. . Zigzag $\pm 10^\circ/\pm 10^\circ$ manevrasında KVLCC1 teknesinde olduğu gibi tüm modeller içerisinde çok iyi sağlandığı bir model elde edilemese de simülasyonun ilk aşırı dönme zamana kadar olan kısımda uyum iyidir. Zigzag $\pm 10^\circ/\pm 10^\circ$ manevrasında başta Model 1 ve Model 2 olmak üzere genel manada modellerin gerçek değerlerle uyumları başarılıdır.

Sonuç olarak bu tez kapsamında tankerlerin manevra performanslarının belirlenmesi için sistem temelli metotlardan deneysel yöntemler ve sistem tanımlama kullanılmıştır. Gelecek çalışmalar adına öncelikli olarak farklı boyutlarda tekneler ile tutsak model deneyleri yapılarak hidrodinamik katsayılar ve ilgili parametreler için daha fazla veri ve bilgi oluşturulabilir. Ayrıca sistem tanımlama yönteminin kullandığı algoritmalar değiştirilerek farklı yöntemlerin performansları denenebilir. Son olarak benzer yaklaşımlar konteynır, askeri gibi farklı tekne türleri için gerçekleştirilerek manevra performansları belirlenmesi adına matematiksel modeller değerlendirilebilir.

4. KAYNAKLAR

- Abkowitz, M. A., 1964. Lectures on Ship Hydrodynamics – Steering and manoeuvrability. Hydro- and Aerodynamics Laboratory. Report No. Hy-5, Lyngby.
- Abkowitz, M. A., 1980. Measurement of Hydrodynamic Characteristics from Ship Maneuvering Trials By System Identification.
- Ankudinov, V., Kaplan, P. ve Jacobsen, B. K., 1993. Assessment and Principal Structure of the Modular Mathematical Model For Ship Maneuverability Prediction and Real-Time Maneuvering Simulations, International Conference on Marine, Simulation Ship, Manoeuvrability.
- Asinovsky, V., McMullen, J. ve Landsburg, A., 1900. Ship Manoeuvrability Analysis Using the Differential Approach, International Conference on Ship Manoeuvrability--Prediction and Achievement
- Åström, K. J. ve Källström, C., 1976. Identification of Ship Steering Dynamics, Automatica, 12.1, 9-22.
- Blanke, M., 1981. Ship Propulsion Losses Related to Automated Steering and Prime Mover Control, PhD thesis, The Technical University of Denmark, Lyngby.
- Bogdan, G., 2010. Ship Manoeuvring by Pmm-Mathematics and Experiments Part I, Part II, Journal of Marine Technology & Environment, 1.
- Clarke, D., Gedling, P. ve Hine, G., 1983. The Application of Manoeuvring Criteria in Hull Design Using Linear Theory, Transactions of RINA, 45-68.
- Dand, I., 1900. On Modular Manoeuvring Models, International Conference on Ship Manoeuvrability--Prediction and Achievement.
- Eloot, K., 2006. Selection, Experimental Determination and Evaluation of a Mathematical Model for Ship Manoeuvring in Shallow Water, Ghent University.
- Fossen, T. I., 1994. Guidance and Control of Ocean Vehicles, New York: John Wiley.
- Fossen, T. I., Sagatun, S. I. ve Sørensen, A. J., 1996. Identification of Dynamically Positioned Ships, Control Engineering Practice, 4.3, 369-376.
- Fujii, H. ve Tuda, T., 1961. Experimental Researches on Rudder Performance 2, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 109, 109-110.
- Haddara, M. R. ve Wang, Y., 1999. Parametric Identification of Manoeuvring Models for Ships. International Shipbuilding Progress, 46, 445, 5-27.

- Hess, D., ve Faller, W., 2001. Simulation of Ship Maneuvers Using Recursive Neural Networks, Twenty-Third Symposium on Naval Hydrodynamics.
- Hooft, J. P., 1994. The Cross-Flow Drag on a Manoeuvring Ship, Ocean Engineering, 21, 3, 329-342
- Hwang, W.Y., 1980. Application of System Identification to Ship Maneuvering, Doctoral Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA.
- Inoue, S., Hirano, M. ve Kijima, K., 1981. Hydrodynamic Derivatives on Ship Manoeuvring, International Shipbuilding Progress, 28, 321, 112-125.
- ITTC, 2008. The Manoeuvring Committee Final Report and Recommendations to the 25th ITTC.
- Källström, C. G. ve Åström, K. J., 1981. Experiences of System Identification Applied to Ship Steering, Automatica, 17,1, 187-198.
- Kijima, K. ve Nakiri, Y., 1990. Prediction Method of Ship Manoeuvrability in Deep and Shallow Waters.
- Kijima, K. ve Tanaka, S., 1993. On a Prediction Method of Ship Manoeuvring Characteristics.
- Kose, K., 1982. On a New Mathematical Model of Maneuvering Motions of a Ship and its Applications, International Shipbuilding Progress, 29,336, 205-220.
- Lewis, E. V., 1989. Principles of Naval Architecture, 3, Jersey City: Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- Ljung, L., 1999. System identification (2nd ed.): Theory for the User, Prentice Hall PTR.
- Luo, W., Guedes Soares, C. ve Zou, Z., 2016. Parameter Identification of Ship Maneuvering Model Based on Support Vector Machines and Particle Swarm Optimization, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 138,3, 031101-031101.
- Luo, W. ve Zou, Z., 2009. Parametric Identification of Ship Maneuvering Models by Using Support Vector Machines. Journal of Ship Research, 53, 1, 19-30.
- Martinussen, K., ve Linnerud, I., 1987. Techniques for Predicting Maneuvering Characteristics of Ships at the Design Stage, Ship Maneuverability Prediction and Achievement, RINA, London.
- Mask, J. L., 2011. System Identification Methodology for a Wave Adaptive Modular Unmanned Surface Vehicle, Master Thesis, Florida Atlantic University.
- Moreira, L. ve Guedes Soares, C., 2003. Dynamic Model of Manoeuvrability Using Recursive Neural Networks. Ocean Engineering, 30,13, 1669-1697.

- Moreno-Salinas, D., Chaos, D., de la Cruz, J., Manuel, S., ve Aranda, J., 2013. Identification of a Surface Marine Vessel Using LS-SVM. Journal of Applied Mathematics, 11.
- Norrbin, N. H., 1971. Theory and Observations on the Use of a Mathematical Model for Ship Manoeuvring in Deep and Confined Waters.
- Ødegård, V., 2009. Nonlinear Identification of Ship Autopilot Models, Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
- Ogawa, A, ve Kasai H., 1978. On the Mathematical Method of Manoeuvring Motion of Ships, Int Shipbuild Prog, 25,292,306–319.
- Ogawa A, Koyama T, ve Kijima, K., 1977. MMG Report-I, on the Mathematical Model of Ship Manoeuvring, Bull Soc Naval Archit Jpn, 575, 22–28.
- Otzen, J. F. ve Agdrup, K., 2008. Manoeuvring Prediction Based on Pmm Tests for Two Versions of a VLCC Tanker, Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Method, Workshop Proceedings, 1, 39-44.
- Perez, T. ve Fossen, T. I., 2011. Practical Aspects of Frequency-Domain Identification of Dynamic Models of Marine Structures from Hydrodynamic Data, Ocean Engineering, 38, 2–3, 426-435.
- Rhee, K.P., ve Kim, K., 1999. A New Sea Trial Method for Estimating Hydrodynamic Derivatives, Journal of Ship and Ocean Technology, 3, 3, 25-44.
- Bhattacharyya, S. K. ve Haddara M. R., 2006. Parametric Identification for Nonlinear Ship Maneuvering. Journal of Ship Research, 50, 3, 197-207.
- Oltmann P. ve Sharma S.D., 1984. Simulation of Combined Engine and Rudder Maneuvers Using an Improved Model of Hull-Propeller-Rudder Interactions, Fifteenth Symposium on Naval Hydrodynamics.
- Sabuncu, T., 1985. Gemi Manevraları ve Kontrolü, İTÜ Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi.
- Sarıöz, K., 2010. Denizaltı Hareket Denklemleri, Ders Notu, İTÜ Deniz Teknolojisi Bölümü.
- Simman, 2008a. Part B Benchmark Test Cases, Retrieved from Copenhagen.
- Simman, 2008b. Part B Model Test Reports, Retrieved from Copenhagen.
- Simman. (2008). Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvering Simulation Methods. <http://www.simman2008.dk>. 01 Ocak 2013
- Sun Young, K. ve Yeon Gyu, K., 2008. Prediction of Maneuvering Performance for KVLCC1 & KVLCC2 Based on Pmm Data, Workshop on Verification and

- Validation of Ship Manoeuvring Simulation Method, Workshop Proceedings, 1, 22-27.
- The Research Committee of Dynamic Performance, 1985. Manoeuvring and Control Section Prediction of Manoeuvrability of a Ship, Bulletin of the Society of Naval Architects of Japan, 668.
- Wagner-Smitt, L., 1971. Steering and Manoeuvring of Ships – Full Scale and Model Tests, European Shipbuilding, 19, 6.
- Wang, X.G., Zou, Z.J., Xu, F. ve Ren, R.Y., 2014. Sensitivity Analysis and Parametric Identification for Ship Manoeuvring in 4 Degrees of Freedom, Journal of Marine Science and Technology, 19, 4, 394-405.
- Wang, X.G., Zou, Z.J., Yang, Z. ve Xu, F., 2015. Sensitivity Analysis of the Hydrodynamic Coefficients in 4 Degrees of Freedom Ship Manoeuvring Mathematical Model, Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 20(5), 584-590.
- Wang, X.G., Zou, Z.J., Yu, L. ve Cai, W., 2015. System Identification Modeling of Ship Manoeuvring Motion in 4 Degrees of Freedom Based on Support Vector Machines, China Ocean Engineering, 29,4, 519-534.
- Yasukawa, H. ve Yoshimura, Y., 2015. Introduction of MMG Standard Method for Ship Maneuvering Predictions, Journal of Marine Science and Technology, 20, 1, 37-52.
- Yoon, H., 2009. Phase-Averaged Stereo-PIV Flow Field and Force/Moment/Motion Measurements for Surface Combatant in PMM Maneuvers, Doctoral Thesis.
- Yoon, H. K. ve Rhee, K. P., 2003. Identification of Hydrodynamic Coefficients in Ship Maneuvering Equations of Motion by Estimation-Before-Modeling Technique, Ocean Engineering, 30, 18, 2379-2404.
- Yoon, H. K., Son, N. S. ve Lee, G. J., 2007. Estimation of the Roll Hydrodynamic Moment Model of a Ship by Using the System Identification Method and the Free Running Model Test, IEEE Journal of Oceanic Engineering, 32, 4, 798-806.
- Yoshimura, Y., 2005. Mathematical Model for Manoeuvring Ship Motion (MMG model), Workshop on Mathematical Models for Operations Involving Ship-Ship Interaction, Tokyo.
- Yoshimura Y., Ueno M. ve Yoshiaki, T., 2008a. Analysis of Steady Hydrodynamic Force Components and Prediction of Manoeuvring Ship Motion with KVLCC1, KVLCC2 and KCS, SIMMAN 2008. Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Method, Workshop Proceedings, 1, 80-86.
- Yoshimura Y., Ueno M. ve Yoshiaki, T., 2008b. Effects of Rudder and Propeller on Hull Force Derivatives with KVLCC1 and KVLCC2. Workshop on Verification

and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Method, Workshop Proceedings, 1,87-90.

Zaojian, Z., 2006. Ship Manoeuvring and Seakeeping, Lecture Notes, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University.

Zhang, X.G. ve Zou, Z.J., 2011. Identification of Abkowitz Model for Ship Manoeuvring Motion Using ϵ -Support Vector Regression, Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 23,3, 353-360.

Zhou, W.W. ve Blanke, M., 1986. Identification of a Class of Nonlinear State-Space Models Using RPE Techniques, Decision and Control, 25th IEEE Conference.



ÖZGEÇMİŞ

1985 yılında Trabzon'un Sürmene ilçesinde doğdu. Lise öğrenimini Sürmene Hasan Sadri Yetmişbir Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2004 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Sürmene Deniz Bilimleri Fakültesi Gemi İnşaatı Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. 2008 Haziran ayında Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisi olarak dereceyle mezun oldu. 2011 Ocak ayında Eğitim ve Öğretim Güz Yarıyılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2009-2017 yılları arasında Karadeniz Teknik Üniversitesi Sürmene Deniz Bilimleri Fakültesi Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yaptı. İyi seviyede İngilizce bilmektedir.