

Gemilerin Manevra Performans Tahminleri için Genel Bir Değerlendirme-I

Ömer Faruk Sukas¹, Ömer Kemal Kınacı², Şakir Bal³

ofsukas@gmail.com¹, kinacio@itu.edu.tr², sbal@itu.edu.tr³

^{1,2,3} Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, TÜRKİYE

Özet

Bir gemiye ait manevra performansını tek bir kriter ile tanımlayabilmek mümkün olmadığı için toplam manevra performansını etkileyen her bir unsur ayrı ayrı ele alınmalıdır. Gemilerin manevra performans tahminlerinin incelendiği bu çalışma iki bölümden oluşmaktadır. Çalışmanın ilk bölümünde literatürde yer alan bazı çalışmalar sınıflandırılarak eksik veya az sayıda çalışılmış olan konuların belirlenmesi amaçlanmıştır. İlk olarak manevra performansının incelenmesi konusu gemi tipine göre sınıflandırılarak bu konu ile ilgili yapılan çalışmalardan bahsedilmiş ve manevra hareketinin lineer ve lineer olmayan temel denklemleri türetilmiştir. Bu denklemlere bağlı olarak manevra performans analizlerinde kullanılan matematik modellerin nasıl oluşturulduğu ve çözümlendiği anlatılmıştır. Ayrıca gemilerin manevra performanslarının hangi yollarla belirlenebileceği ve manevra katsayılarının elde edilme yöntemleri anlatılmıştır. Bu yöntemlerin kullanıldığı bazı çalışmalarda elde edilen sonuçlar gösterilmiş ve yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Gemi manevraları; manevra türevi; hidrodinamik katsayı; hesaplamalı akışkanlar dinamiği; katamaran; denizaltı; tek gövdeli gemi; matematik model; dönme testi; zigzag testi; manevra performansı; düzlemsel hareket mekanizması

A Review on Prediction of Ship Manoeuvring Performance, Part 1

Ömer Faruk Sukas¹, Ömer Kemal Kınacı², Şakir Bal³

ofsukas@gmail.com¹, kinacio@itu.edu.tr², sbal@itu.edu.tr³

^{1,2,3} Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, TÜRKİYE

Abstract

Since it is not possible to evaluate the maneuvering performance of a ship with a single criterion, each factor that affects the total maneuvering performance must be considered separately. This study, which examines the evaluation of maneuvering performance of ships, consists of two parts. In the first part of the study, some studies in the literature were classified and it was aimed to determine the subjects that were studied rarely. First of all, the studies about maneuvering performance were classified according to the ship type and the studies in the literature related to this subject were mentioned. After that, the linear and nonlinear equations of maneuvering motion were derived. Based on these equations, it was explained how mathematical models used in maneuvering performance analyses are derived and solved. Furthermore, the ways in which the maneuvering performance of ships can be determined and the methods of obtaining the maneuvering coefficients were explained. Finally, the results obtained in some studies were shown and interpreted.

Keywords: ship maneuvering, hydrodynamic coefficients, maneuvering derivatives, computational fluid dynamics, catamaran, submarine, monohull, mathematical model, spiral test, zigzag test, maneuvering performance, planar motion mechanism

Terminoloji

HAD:	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği	X:	İleri öteleme kuvveti
STY:	Sistem Tanılama Yöntemi	Y:	Yanal öteleme kuvveti
DHM:	Düzlemsel Hareket Mekanizması	N:	Savrulma momenti
SHT:	Serbest Hareketli Test	K:	Yalpa momenti
IMO:	International Maritime Organization	L:	Gemi tam boyu
SD:	Serbestlik Derecesi	B:	Gemi gövde genişliği
DKT:	Döner Kol Testi	h:	Su derinliği

RANS:	Reynolds Averaged Navier-Stokes	T:	Su çekimi
URANS:	Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes	β :	Sürüklenme açısı
DNS:	Direct Numerical Simulation	δ :	Dümen açısı
DES:	Detached Eddy Simulation	ψ :	Pruva açısı
LES:	Large Eddy Simulation	φ :	Yalpa açısı
SEY:	Sınır Elemanları Yöntemi	u :	Bağlı eksen takımında ileri ötelenme hızı
ITTC:	International Towing Tank Conference	v :	Bağlı eksen takımında yanıl ötelenme hızı
PIV:	Particle Image Velocimetry	r :	Bağlı eksen takımında açılal savrulma hızı
EKKY:	En Küçük Kareler Yöntemi	\dot{u} :	Bağlı eksen takımında ileri ötelenme ivmelenmesi
GKF:	Genişletilmiş Kalman Filtresi	\dot{v} :	Bağlı eksen takımında yanıl ötelenme ivmelenmesi
MMG:	Matematiksel Modelleme Grubu	\dot{r} :	Bağlı eksen takımında açılal savrulma ivmelenmesi
LCG, x_G :	Geminin Boyuna Ağırlık Merkezinin Mastoriye Olan Uzaklığı	A:	Yanal genlik mesafesi
Fr:	Froude Sayısı	ω :	Harmonik hareket frekansı
m:	Deplasman kütlesi	λ :	Ölçek oranı; Dalga boyu
I_z :	Z eksenini etrafındaki atalet momenti	H:	Dalga yüksekliği

1. Giriş

Manevra kabiliyeti en sade anlatımıyla, bir geminin istenen yönde kontrollü bir şekilde yön değiştirebilmesi ve bu değişim sonrasında sabit bir rota üzerinde sapmalar olmaksızın seyrine devam edebilmesidir. Gemilerin manevra performanslarını iyileştirmek, çoğu zaman yüksek maliyet ve uzun hesaplama zamanı gerektiren bir süreçtir. Dönme yeteneği ve rota tutma kabiliyeti gibi manevra performansına ait temel özellikler çoğu zaman birbirleriyle çelişkili dizayn özellikleri gerektirdiği için her açıdan manevra yeteneği iyi olan bir gemi tasarlamak zorlu bir problemdir. Bundan dolayı, her gemi tipinin operasyon tanımına göre dizayn aşamasında, maliyet ve performans iyileştirme kısıtları altında etkili bir optimizasyon yapılması şarttır.

Gemilerin öndizayn aşamasında manevra performanslarını tahmin edebilmek için yapılan analizlerde, rota tutma kabiliyeti, dinamik stabilite, dönme kabiliyeti, rota değiştirme kabiliyeti ve durma kabiliyeti gibi parametreler göz önüne alınmaktadır. Ayrıca teknenin manevra performans isteklerine uygun dümen boyutlarının da bu aşamada yaklaşık olarak belirlenmesi gerekmektedir. Manevraya ait bu temel özellikler lineer hareket denklemleri baz alınarak elde edilir. İlk olarak manevra performansının tahmin edilebilmesi için bazı lineer yaklaşımlardan faydalanılır. Daha ileri analiz gerektirecek durumlarda, sevk ve kontrol sistemlerinin de hesaba katılması ile birlikte manevra kabiliyeti açısından en uygun gemi dizaynının yapılabilmesi için hesaplamaların lineer olmayan yöntemlerle yapılması gerekmektedir. Bu aşamada genellikle, ileri ötelenme (surge), yanal ötelenme (sway), savrulma (yaw) ve yalpa (roll) hareketlerini baz alan ve lineer olmayan matematik modeller kullanılarak manevra performans analizleri yapılmaktadır. İlk aşamada matematik modellerin içerisinde yer alan manevra türevleri (hidrodinamik katsayılar) amprik, yarı-ampirik veya istatistiksel yöntemler kullanılarak hesaplanabilmektedir. Böylece, farklı tekne-dümen-pervane konfigürasyonları için dönme, rota değiştirme ve durma yeteneklerinin belirlenebilmesi için kabaca bir tahmin yapılabilmektedir. Kullanılan modelin doğruluğu (hassasiyeti) arttırılmak istenirse, ilerleyen aşamalarda, model deneyleri, sınır elemanları yöntemleri veya hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemleri ile matematiksel model içerisinde yer alan manevra türevlerinde düzeltmeler gerçekleştirilebilmektedir.

Bu çalışmada, gemilerin manevra performanslarının tahmin edilmesiyle ilgili son yıllara ait önemli sayıda çalışma incelenerek literatürde eksik veya az sayıda çalışılmış olan konular belirlenmeye çalışılmıştır. İlk olarak, manevra performansı kapsamında ele alınan çalışmalar tek gövdeli gemiler, çift gövdeli gemiler ve denizaltılar olmak üzere üç bölüme ayrılarak her bir form ile ilgili yapılan çalışmalardan kısaca bahsedilmiştir. Sonraki bölümde, manevra hareketlerinin matematiksel modelini oluştururken kullanılan lineer ve lineer olmayan temel hareket denklemleri anlatılmıştır. Son bölümde ise, gemilerin manevra performanslarını belirleme yöntemleri sınıflandırılarak bu yöntemlerin kullanıldığı bazı çalışmalarda elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır.

2. Manevra performansının gemi tipine göre irdelenmesi

Literatürde tek ve çift gövdeli gemilerin(katamaranlar) manevra katsayılarının belirlendiği ve manevra performanslarının farklı yöntemler kullanılarak incelendiği çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar genellikle, kullanılan matematik modellerin ne ölçüde doğru sonuçlar verdiğini saptamak ve HAD yöntemi ile elde edilen sonuçları deneysel verilerle doğrularak yöntemin geçerliliğini gösterebilmek amacıyla yapılmıştır. Araştırmacılar tarafından gemi veya denizaltı modellerinin direnç,

sevk, denizcilik ve manevra açısından performansları farklı yöntemlerle incelenerek elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Bu sonuçlar neticesinde hangi yöntemlerin daha verimli olduğu, hangi yöntemlerden daha hızlı sonuç alınabildiği, hangi hidrodinamik türev bileşeninin manevra performansını nasıl etkilediği veya iç ve dış faktörlerin geminin manevra kabiliyetlerini ne ölçüde etkilediği gibi sorulara cevap bulmaya çalışılmıştır. Bu bölümde, önce, tek ve çift gövdeli gemiler ile ilgili yapılan çalışmalardan, daha sonra da denizaltılar ile ilgili gerçekleştirilmiş araştırmalardan bahsedilecektir.

2.1. Tek gövdeli gemiler

Bugüne kadar yapılmış olan çalışmaların birçoğunda gemilerin manevra kabiliyetleri genellikle tek gövdeli (monohull) formlar için incelenmiştir. Bu durumun en önemli sebeplerinden birisi, çok gövdeli (multihulls) gemilerin manevraları esnasında gövdeler arası etkileşimin tekne üzerinde oluşan hidrodinamik kuvvetlere etkisi olduğunun bilinmesidir. Çok gövdeli teknelere özel olan bu durum problemin çözümünü kısmi de olsa zorlaştırmaktadır. Bu yüzden araştırmacılar, ilk olarak farklı iç ve dış etkileri hesaba katmadan (sığ su, çoklu gövde, dar kanal, dalgalı durum vs.) gemilerin manevra katsayılarını doğru ve hassas bir şekilde hesaplayabilmek ve buna bağlı olarak manevra performanslarını tahmin edilebilmek için tek gövdeli test gemi modellerini kullanarak incelemeler yapmışlardır. 2008 ve 2014 yıllarında gerçekleştirilen SIMMAN (Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods) çalıştaylarında manevra problemleri için KCS, KVLCC1-2 ve DTMB5415 test modelleri kullanılmıştır. Ancak KVLCC1 ve KVLCC2 gemi formlarının benzer olmasından ötürü SIMMAN 2014 çalıştayında, KVLCC serisinden sadece KVLCC2 modeli değerlendirmelere dahil edilmiştir. SIMMAN 2008’de, seçilen test gemi modellerinin derin sudaki manevra performansları ve SIMMAN 2014’te sığ su performansları asıl inceleme konusu olmuştur. 2019 yılında düzenlenecek olan SIMMAN 2019 çalıştayında ise seçilecek test modellerin dalgalı sudaki manevra performansları üzerinde durulacağı belirtilmiştir. SIMMAN çalıştaylarının yanısıra 2016 yılında DTC (Duisburg Test Case) test modelinin, sığ ve kısıtlı sularda manevra performansının incelendiği MASHCON (Conference on Manoeuvring in Shallow and Confined Water) isimli konferans düzenlenmiştir. Bu konferansta sunulan çalışmalardan bazıları Proceedings of 28th ITTC (2017)’de verilmiştir.

Sayısal veya deneysel gemi manevraları çalışmalarında sıklıkla kullanılan test modellerinden birincisi KCS’dir. Bu model araştırma amaçlı bir konteyner gemisi olarak dizayn edilmiş olup referans model olarak belirlendiği için deneysel sonuçları tüm araştırmacılara açıktır. Gothenburg 2000 (Larsson vd., 2003), Tokyo 2005 (Takanori, 2005) ve Gothenburg 2010 (Larsson vd., 2013) gibi çalıştay ve konferanslarda da bu modele ait deneysel veriler araştırmacılar tarafından sayısal doğrulama amaçlı kullanılmıştır. Örneğin, Simonsen ve Stern (2008) KCS modelinin salt savrulma testinden (Pure Yaw Test) elde ettikleri hidrodinamik kuvvet ve moment sonuçlarını sayısal sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Ancak sayısal sonuçlar için sağlama ve doğrulama çalışması yaparken simülasyonlarda düşük ağ elemanı düzeltme oranı (grid refinement ratio) kullandıkları için seçmiş oldukları sağlama-doğrulama yöntemini (Stern vd., 2006) başarılı bir şekilde uygulayamamışlardır. Diğer bir çalışmada, KCS modelinin tam ölçekli HAD simülasyonları yapılmıştır (Kim vd., 2015). Bu çalışmada yanal öteleme kuvveti (Y) ve savrulma momenti (N) sonuçları, deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Kuvvet ve moment sonuçlarının statik sürüklenme testi (Static Drift Test) ve salt yanal ötelenme testi (Pure Sway Test) için genel olarak uyumlu olduğu ancak, salt savrulma testinde lineer olmayan etkilerin de

artmasıyla birlikte bağıl hatanın arttığı belirtilmiştir. Manevra türevlerinde ise sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki fark en düşük %4, en yüksek %96 olarak bulunmuştur. Özellikle düşük GM değerine sahip KCS test modeli ile yapılacak olan HAD simulasyonlarında üç serbestlik dereceli (SD) harekete izin verilmesinin yeterli olmayacağı, doğru sonuçlar elde edebilmek için yalpa etkisinin de hareket denklemlerine dahil edilerek problemin en az dört SD olarak modellenmesi gerektiği belirtilmiştir (ITTC-Manoeuvring Committee, 2017). Gemilerin manevra performansı manevra türevlerinin hesaplanmasıyla değerlendirilebileceği gibi doğrudan sayısal veya deneysel olarak manevra performans testleri gerçekleştirilerek de değerlendirilebilir. Bu konuda Carrica vd. (2016) sayısal ve deneysel çalışmalar yaparak KCS modelinin çok düşük hızda ($Fr=0.095$) ve sığ suda ($h/T=1.2$) zigzag testini ($20^\circ/5^\circ$) doğrudan modellemişlerdir. Sayısal hesaplamalarda 8.7 milyon ağ elemanından 71.3 milyon ağ elemanına kadar çıkılarak çözüm yapılmış ve sayısal sonuçların belirsizlik yüzdeleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Zigzag testi için belirsizlik analizi, zamana bağlı (transient) olarak yapılmış olan simulasyonlardaki aynı prosedürler uygulanarak zamandan bağımsız (steady-state) durumlar için de gerçekleştirilmiş ancak, bu şekilde sonuçların çoğunun yakınsamadığı belirtilmiştir. Bunun nedeni olarak gerçekte zigzag testi yapılırken modelin olayın doğası gereği hiçbir zaman sabit bir rejime oturmaması olduğu söylenebilir. Deneylerde ise hassasiyeti belirleyebilmek için tüm testler on defa tekrarlanmış ve neticede %3'lük bir standart sapma değeri belirlenmiştir. Bu mertebelerdeki standart sapmaya sahip deneysel sonuçlar, elde edilen verilerin HAD doğrulaması için güvenilir olduğunu göstermektedir. Çalışmada HAD yöntemi ile bulunan aşırı sapma açısı (overshoot angle) ve dönme oranı (yaw rate) için deney sonuçlarına göre sırasıyla %15 ve %20'lik bağıl hata hesaplanmıştır. Bunlar haricinde incelenen diğer tüm parametrelerdeki bağıl hata değerlerinin %3'ün altında olduğu belirtilmiştir. Bu duruma tekne ve dümen üzerine etkiyen savrulma momenti değerlerinin diğer parametrelere nazaran daha az doğrulukta tahmin edilmesinin sebep olduğu söylenmiştir. Aynı modelin kullanıldığı diğer bir deneysel çalışmada ise döner kol testi (DKT) ile tekneye etkiyen hidrodinamik kuvvetler ve moment, dümen ve pervane üzerine etkiyen kuvvetler, yalpa açısı, baş-kıç vurma açısı ve dalıp-çıkma genliği gibi değişkenler baz alınarak kapsamlı bir deneysel belirsizlik analizi yapılmıştır (Ueno vd., 2009). Yalpa açısı, baş-kıç vurma açısı ve dalıp çıkma genliği için hesaplanan belirsizlik yüzdelerinin kuvvet ve momentlere nazaran daha yüksek çıktığı belirtilmiştir. Ancak bu durumun manevra türevlerine doğrudan etkisinin olmadığı ve DKT ile dönmeye ait hidrodinamik katsayıların ($Y_r, Y_{\dot{r}}, N_r, N_{\dot{r}}$) doğru bir şekilde hesaplanabileceği belirtilmiştir.

Literatürde test modeli olarak sayısal ve deneysel sonuçları paylaşılan modellerden bir diğeri de DTMB 5415'tir (DTMB5512 ise bu modelin 1/46.6 ölçekli halidir). Bu model Amerikan Deniz Kuvvetleri tarafından 1980 yılında su üstü muharip gemisi olarak tasarlanmıştır. Gemi formunun bir modeli 2000 yılında MARIN (Maritime Research Institute Netherlands) tarafından 1/35.48 ölçekli (DTMB5415) olarak üretilmiş ve aynı yerde serbest hareketli testleri (SHT) gerçekleştirilmiştir. Literatürde DTMB5512 modelinin takıntısız (sadece yalpa omurgaya sahip) formu için yapılmış kapsamlı bir deneysel çalışma bulunmaktadır (Yoon, 2009). Bu çalışmada, modelin farklı serbestlik derecelerine sahip durumlarda üç farklı hız için ($Fr=0.138, 0.28, 0.41$) statik sürüklenme ve düzlemsel hareket mekanizması (DHM) testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar irdelendiğinde genellikle lineer manevra türevlerinin lineer olmayanlara göre hız değişiminden daha az etkilendiği belirtilmiştir. Bunun yanı sıra farklı çekme havuzlarında farklı boyutlardaki modellerle yapılan test sonuçları değerlendirilerek yanal ötelenme testinden elde edilen türevlerin, savrulma testinden elde edilen türevlere göre ölçek etkisinden daha az etkilendiği söylenmiştir. Deneylerde kullanılan modelin serbestlik derecesinin de (SD) özellikle lineer olmayan manevra türevlerini büyük ölçüde etkilediği belirtilmiştir. Bu çalışmada ayrıca kapsamlı bir deneysel belirsizlik analizi çalışması

yapılmıştır. Toplam belirsizlik oranının (U_r), kuvvetler ve moment için statik testlerde %2-4 aralığında iken dinamik testlerde %1-10 aralığında olduğu belirtilmiştir. Bunlara ek olarak üç farklı çekme tankında (IIHR, FORCE ve INSEAN) farklı ölçekli DTMB modelleri ($L=3.048$ m, $L=4.002$ m ve $L=5.720$ m) kullanılarak yapılan deneylerdeki toplam belirsizlik oranları karşılaştırılmıştır. Toplam deneysel belirsizlik değerlerinin ($U_r\%$) statik testlerde model boyundan neredeyse bağımsız olduğu ancak, dinamik testlerde boy arttıkça azaldığı belirtilmiştir. Bunun yanı sıra hem statik hem de dinamik testlerde Fr sayısı arttıkça belirsizlik değerlerinde yine bir azalma olduğu söylenmiştir. DTMB5512 modelinin takıntısız formu için yapılmış olan bir başka çalışmada, viskoz HAD yöntemi ile salt savrulma testi yapılmış ve dönmeye ait hidrodinamik türevler bulunmuştur (Sakamoto ve Ohashi, 2012). Bu çalışmada elde edilen ileri öteleme (X) kuvveti ile deneysel sonuçlar arasında bir faz farkı olduğu belirtilmiştir. X kuvvetindeki bu faz farkının bazı diğer çalışmalarda da görüldüğü söylenebilir (Mousaviraad vd., 2012). Ayrıca sayısal hesaplamalarda kullanılan farklı türbülans modellerinin hidrodinamik kuvvetler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. X kuvvetinin %60'lık kısmının sürtünme kuvveti bileşeni olduğu ve bu yüzden %10'un altında sürtünme bileşenine sahip olan Y yönündeki kuvvete göre türbülans modeli etkisinin X yönündeki kuvvet üzerinde daha baskın olduğu söylenmiştir. Ek olarak geminin baş kısmındaki ağ örgüsü yoğunluğunun yanal kuvvet ve savrulma momenti üzerinde önemli etkisi olduğu belirtilmiştir. Özellikle, salt savrulma testinde ağ örgüsündeki yoğunluk değişiminin zaman adımıdaki (Δt) değişime kıyasla hidrodinamik kuvvetler ve moment üzerinde daha fazla etkili olduğu başka bir çalışmada da belirtilmiştir (Sakamoto vd., 2012). Miller (2008) aynı modelin hem takıntılı hem de takıntısız formu için elde ettiği sayısal sonuçları değerlendirmiştir. Kuvvet ve moment değerleri için deneysel verilere kıyasla takıntılı formdaki bağlı hatanın takıntısız forma göre daha fazla olduğunu söylemiştir. Başka bir çalışmada ise sayısal hesaplamalarda URANS (Unsteady RANS) ve DNS (Direct Numerical Simulation) yaklaşımları kullanılarak DTMB5415 formunun sakin ve dalgalı suda SHT simulasyonları gerçekleştirilmiş, manevra esnasında geminin takıntılıları etrafında oluşan girdaplar incelenmiştir (Carrica vd., 2008). DNS yaklaşımının, özellikle statik çekme testlerini yaparken yüksek sürüklenme açılarında URANS'a göre daha doğru sonuçlar verdiği belirtilmiştir (Sakamoto vd., 2012). Bunların haricinde DTMB modelinin manevra performans tahmini ile ilgili daha özel konuların incelendiği çalışmalar da literatürde mevcuttur (Hajivand ve Mousavizadegan, 2015a, b, Oldfield vd., 2015, Duman ve Bal, 2016).

Çalışmalarda test modeli olarak kullanılan bir diğer gemi modeli ise KVLCC serisidir. Bu seriye ait deneysel veriler de diğer test modellerinde olduğu gibi araştırmacılara açıktır. KVLCC serisi, sayısal sonuçları doğrulamak ve tekne etrafındaki akışın fiziğini detaylı bir şekilde inceleyebilmek amacıyla 1997 yılında KRISO (Korean Research Institute of Ships and Ocean Engineering) tarafından yumrubaş ve ayna kış formuna sahip bir tanker olarak dizayn edilmiştir. Bu seride, geometrik olarak aralarında çok küçük farklılıklar bulunan iki gemi formu bulunmaktadır; birinci form olan KVLCC1 modelinin kış posta hatları daha çok V formuna benzerken, KVLCC2 modelinin kış postaları daha çok U tipinde tasarlanmıştır. İki gemi formu da ilk kez 1999 yılında 1/58 model ölçeğinde üretilmiş ve aynı yerde DHM testleri gerçekleştirilmiştir. Literatürde KVLCC serisi kullanılarak yapılmış birçok sayısal ve deneysel çalışma bulunmaktadır. Örneğin, Cura-Hochbaum (2011) düşük Fr sayısında ($Fr=0.15$) serbest yüzey etkilerini hesaba katmadan KVLCC1 modelinin manevra türevlerini HAD yöntemi ile hesaplamıştır. Düşük hızlarda ($Fr<0.15$) yapılacak manevra simulasyonlarında serbest yüzey etkileri probleme dahil edilmeyince çözüm süresinin yaklaşık on kat azaldığını belirtmiştir. Çalışma sonucunda elde ettiği manevra türevlerini Abkowitz'in önermiş olduğu matematik modelde (Abkowitz, 1964) yerine koyarak geminin dönme ve zigzag yörüngelerini hesaplamıştır. Abkowitz modeli gemi üzerindeki X , Y kuvvetleri ve N momentinin belirli bir mertebeye kadar Taylor serisine

açılmasıyla elde edilmiştir. Bu model haricinde hidrodinamik kuvvetleri ve momenti, pervaneye, dümene ve tekneye etkileyen olmak üzere üç ayrı kısımda ele alan başka bir model (MMG) de çalışmalarda kullanılmaktadır (Ogawa ve Kasai, 1978). Kullanılan bu modeller ileriki bölümlerde ayrıntılı bir şekilde anlatılacaktır. He vd. (2016) ise MMG modelini kullanarak önce regresyon tekniği, daha sonra HAD yöntemi ile KVLCC2 test modeline ait lineer manevra türevlerini elde etmiştir. HAD yöntemi ile hesapladığı türev değerleri ile regresyon analizi yardımıyla hesapladığı türevleri matematik model içerisinde değiştirip, iki yöntemin hesapladığı dönme ve zigzag yörüngelerini mukayese etmiştir. HAD yöntemi ile bulunan manevra türevleri kullanıldığında özellikle, zigzag rotasının deneysel sonuçlara daha yakın olduğu belirtilmiştir. KVLCC serisine ait iki geminin de kullanıldığı bir başka çalışmada, gemiye etkileyen yanal kuvvet (Y) ve savrulma momentinin (N) ikinci ve üçüncü dereceden polinomlarla temsil edildiği durumlar için MMG matematik modeli esas alınarak dönme ve zigzag rotaları hesaplanmış ve sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır (Aksu ve Köse, 2017). Sonuç olarak matematik model içerisindeki Y kuvveti ve N momenti denklemlerinin üçüncü dereceden temsil edildiği durumda sonuçların gerçeğe daha yakın olduğu belirtilmiştir. Yine aynı seriyi referans alan başka bir çalışmada ise manevra türevlerinin hesaplanmasında yeni bir yöntem önerilmiştir (Zhang ve Zou, 2013). SVM (Support Vector Machines) olarak adlandırılan ve yapay zeka (artificial intelligence) tabanlı bu yöntem istatistiksel teori temel alınarak uygulanmaktadır. Çalışmada bu yöntemle elde edilen kuvvet ve moment sonuçları deneysel verilerle karşılaştırılmış ve sonuçların birbirleriyle makul derecede uyumlu olduğu belirtilmiştir.

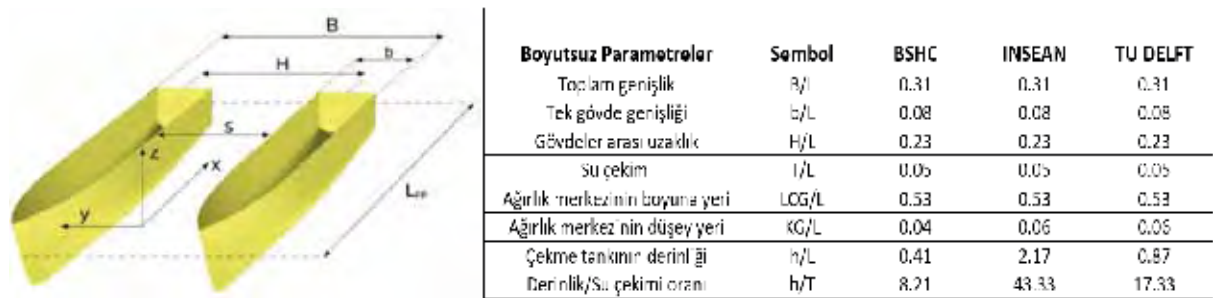
2.2. Çift gövdeli gemiler

Özellikle yolcu taşımacılığı alanında tek gövdeli gemilere kıyasla yüksek hız avantajına sahip olan çift gövdeli gemiler (katamaranlar), tek gövdeli gemilere göre daha düşük yakıt sarfiyatına ve konfor açısından daha üstün performansa sahiptirler. Tek gövdeli gemilerin etrafındaki akış karakteristiğine kıyasla katamaranlar etrafındaki akış daha karmaşıktır. Çünkü, katamaranlarda akış alanı tekne gövdeleri arasındaki etkileşimden ciddi bir şekilde etkilenmektedir ve bu konu sayısal ve deneysel olarak birçok çalışmada incelenmiştir (Zaghi vd., 2011; Broglia vd., 2011; Broglia vd., 2014; He vd., 2014). Ayrıca, tek gövdeli gemilerin aksine bu tip gemilerde akım bileşenlerinin, dalga profilinin ve manevra performansına ait bazı parametrelerin de bahsedilen gövdeler arası girdap etkileşimleri nedeniyle doğru ve hassas bir şekilde tahmin edilmesi oldukça zordur.

Katamaranların manevra performansları, deneysel veya sayısal olarak incelenirken araştırmacılar tarafından genellikle DELFT372 test modeli kullanılmıştır. Zlatev vd. (2009, 2011), Milanov vd. (2010), Milanov ve Stern (2012) bu modelin, sığ ve derin su koşullarında manevra performansını ve düşük sürüklenme açılarında ($\beta < 10^\circ$) tekneye etkileyen hidrodinamik kuvvetleri sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Zlatev vd. (2009), statik sürüklenme testlerinde sürüklenme açısı (β) arttıkça batma ve trim değerlerinin de arttığını belirtmişlerdir. HAD ile elde ettikleri bazı lineer manevra türevleri (Y_v , N_v) ile deneysel sonuçlar arasındaki bağıl hatayı yaklaşık %10 olarak bulmuşlardır. Bu hatanın lineer olmayan manevra türevlerinde (X_{vv} , Y_{vv} , N_{vv}) ise %117'ye kadar çıktığı görülmüştür. Pandey ve Hasegawa (2016) çift pervaneli ve dümensiz bir yüksek hızlı katamaran formunun serbest hareketli testini (SHT) sakin ve derin su koşulunda gerçekleştirmiştir. Burada dümen etkisi pervanelere farklı oranda itme kuvveti verilerek sağlanmıştır. Bu çalışmada gemiye farklı pervane dönüş yönleri ve itme kuvvetlerinden oluşan kombinasyonlarla çok sayıda dönme manevrası yaptırılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar MMG modeli kullanılarak doğrulanmıştır. Matematik model içerisindeki manevra

türevlerinin ise düzlemsel hareket mekanizması (DHM) testlerinden elde edildiği belirtilmiştir. Sonuç olarak dönme çapının büyük oranda pervane dönüş hızına bağlı olarak arttığını belirtmişlerdir.

Brogia vd. (2013) bir katamaranın gövdeleri etrafındaki akışın karakteristiğini incelemek ve girdapların hidrodinamik kuvvetler üzerindeki etkisini daha detaylı irdeleyebilmek için var olan deneysel verileri farklı viskoz HAD çözücülerıyla (Xnavis, CFDSip-Iowa, ISIS-CFD) doğrulamaya çalışmışlardır. Statik sürüklenme testi sonuçları için bu üç HAD çözücüsü arasında X kuvveti için yaklaşık %3.5, Y kuvveti için %4 ve N momenti için %7'lik bir değişim olduğu belirtilmiştir. Başka bir çalışmada ise DELFT372 modelinin statik sürüklenme testi esnasında katamaran gövdeleri ve özellikle baş kısmı etrafında oluşan girdaplar farklı sayısal yaklaşımlarla (DES ve RANS) analiz edilmiş ve bu yaklaşımların sonuçlar üzerindeki etkisi tartışılmıştır. Elde edilen sonuçlar irdelendiğinde yüksek sürüklenme (drift) açıları tekne hareketleri (baş-kıç vurma ve batma) hariç diğer tüm değişkenlerin (hızlar, girdap yapıları ve dalga deformasyonları) deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu belirtilmiştir (Dogan, 2013). Aynı modelin kullanıldığı benzer bir çalışmada farklı hız ve yüksek sürüklenme açıları yapılan (6 ve 9 derece) statik sürüklenme testleri esnasında teknenin baş ve kıç kısımlarında oluşan girdap yapıları deneysel PIV yöntemiyle incelenmiştir (Falchi vd., 2014). PIV yönteminin sağladığı avantajlarla model etrafında oluşan girdap salınımlarının büyüklükleri ve modelin en çok hangi bölgesinde oluştuğu gösterilmiştir. Katamaranlarla ilgili yapılmış olan çalışmalarda genellikle test model olarak kullanılan DELFT372'nin ana boyutları ve farklı model çekme havuzlarındaki h/T oranları Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. DELFT372 modelinin ana boyutları ve farklı çekme tankları için h/T oranları (Dogan, 2013).

Sistem tanılama yönteminin (STY) kullanıldığı bir çalışmada ise bir katamaran formunun seyir tecrübesi sonuçları kullanılarak farklı hız ve dümen açıları geminin dönme manevrası parametreleri (ilerleme, transfer, taktik çap) manevra katsayıları elde edilmeden yüksek doğrulukla (üç parametre için ortalama bağıl hata=%1) hesaplanmıştır (Luo vd., 2014). Ancak bu çalışmada STY ile dönme manevrası için oluşturulan matematik modellerin her bir hız için özel olduğu, genelleştirilmiş ifadeler olmadıkları belirtilmiştir.

Literatürde katamaranlarla ilgili yapılan çalışmalarda genellikle hidrodinamik kuvvetler, savrulma momenti ve manevra katsayıları tahminlerinin haricinde bu parametrelerin doğruluklarını önemli ölçüde etkileyen girdap yapıları hem deneysel hem de HAD yöntemi ile görsel olarak incelenmiştir. Ayrıca, sığ suyun ve yüksek sürüklenme açıları oluşan girdapların hidrodinamik kuvvetlere etkisi de incelenen diğer konu başlıkları arasındadır. Ancak, yine de katamaran formlarının manevra karakteristiklerinin incelenmesiyle ilgili literatürde hala yeterli sayıda sayısal ve deneysel veri bulunmadığı söylenebilir. Var olan çalışmaların ise neredeyse tamamında DELFT372 test modeli kullanılmıştır.

2.3. Denizaltılar

Hem insansız hem de insanla kontrol edilebilen denizaltılar araştırma, arama, kurtarma, sualtı donanım bakım ve onarımı gibi birçok amaçla kullanılabilirler. Bu operasyonlar gerçekleştirilirken özellikle deniz tabanına yakın seyretmek durumunda kalan denizaltıların taban etkisinden dolayı üzerine etkiyen hidrodinamik kuvvet ve momentler çok çabuk ve etkin bir şekilde değişir (Sabuncu, 1985). Bundan dolayı çok amaçlı kullanılabilen bu araçların hidrodinamik performanslarının da iyi olması ve kritik manevra yapılması gereken durumlarda çok kısa süre içerisinde kendisini düzelterip gerekli manevraları yapabilmesi istenir. Dolayısıyla manevra kabiliyetlerinin henüz dizayn aşamasındayken doğru bir şekilde analiz edilmesi gerekir. Denizaltıların da gemilerde olduğu gibi manevra performanslarının ön dizayn aşamasında belirlenmesi yarı-ampirik formüller, HAD ve deneyler yardımıyla olmaktadır.

Denizaltılar, gemilerde olduğu gibi sadece yatay düzlemde değil düşey düzlemde de manevra yapmak zorunda oldukları için başta ve kıçta hem yatay hem de düşey kanatlara (finlere) sahiptirler. Düşey yöndeki hareketlerin de matematik modele eklenmesiyle çözülmesi gereken denklemlerinin sayısı artmış olur. Tyagi ve Sen (2006) HAD yöntemini ve bazı ampirik formülleri kullanarak iki farklı formda insansız denizaltıya ait yanal hıza bağlı bazı manevra katsayılarını (Y_v, Y_{vv}, N_v, N_{vv}) hesaplamışlardır. Düşük hücum açılarında sınır tabakada bir ayrılma söz konusu olmadığından lineer manevra katsayılarının viskoz olmayan sayısal yöntemlerle de elde edilebileceği gösterilmiştir. Ayrıca tamamen batmış cisimlerle ilgili literatürde az sayıda deneysel veri olduğunu belirtmişler ve bu yüzden elde ettikleri sayısal sonuçları benzer geometrilerin sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Denizaltılar ile ilgili yapılacak olan çalışmalarda araştırmacılara DARPA Suboff test modelinin takıntısız (AFF-1) ve tam takıntılı (AFF-8) konfigürasyonlarının kullanılması tavsiye edilmiştir (ITTC-Manoeuvring Committee, 2014). Bu modelin takıntılı formunun kullanıldığı bir çalışmada zamana bağlı ve zamandan bağımsız çözümlerle dinamik ağ örgüsü (overset mesh) kullanılarak modele ait lineer manevra katsayıları elde edilmiştir (Pan vd., 2012). Deneysel verilere kıyasla sayısal sonuçlardaki bağıl hatanın %0.5 ile %45 arasında olduğunu ve bu aralığın ön dizayn aşaması için makul olduğunu söylemişlerdir. Coe (2013), yine aynı ağ örgüsü yapısını kullanarak viskoz HAD yöntemi ile insansız bir denizaltının 6 serbestlik dereceli (SD) SHT'sini gerçekleştirmiştir. Çalışmada ayrıca statik ve dinamik ağ örgüsü kullanımının sonuçlar üzerindeki etkisi karşılaştırılmıştır. Statik (rigid mesh) ve dinamik ağ örgüsü (overset mesh) kullanımının hidrodinamik kuvvetleri ne ölçüde etkilediği yüksek hızlı bir tekne için başka bir çalışmada da incelenmiştir (Sukas vd., 2017). Bu çalışmada yüksek genlikli hareketlere sahip olan teknelerde yüksek Fr sayılarında statik ağ örgüsünün yetersiz kaldığı, dinamik ağ örgüsü kullanıldığında ise sonuçların deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu gösterilmiştir. Denizaltılar da yüksek hızlı tekneler gibi akışkan içerisinde (özellikle manevra yaparken) yüksek genlikli hareketler yaptıklarından dolayı dinamik ağ örgüsü (overset mesh) kullanılması daha uygun görünmektedir. Duvar etkisinin incelendiği bir çalışmada ise Wu vd. (2005), DARPA Suboff modelini kullanarak denizaltının deniz tabanına yakın seyrettiği durumlarda hidrodinamik kuvvetlerin dipten ne ölçüde etkilendiğini incelemişlerdir. Dip etkisini, deniz tabanı ile denizaltı arasındaki mesafenin lineer bir fonksiyonu olarak ifade etmişlerdir. Dip etkisinin yanısıra su yüzeyine yakın seyreden denizaltı üzerindeki serbest su yüzeyi etkisi de incelenen bir başka konu olmuştur. Polis vd. (2013), HAD yöntemi ile DARPA Suboff modelinin farklı şnorkel yüksekliklerinde ve hızlarda manevra katsayıları üzerindeki serbest su yüzeyi etkisini incelemiştir. Denizaltılar için türetilmiş matematik modelin içerisinde serbest su yüzeyi etkisini de temsil edecek hidrodinamik katsayılar eklemiştir. Yeni matematik model kullanılarak elde edilen sonuçların deneysel verilerle uyumlu olduğu belirtilmiştir.

Bir başka çalışmada, yine aynı denizaltı modelinin iki farklı konfigürasyonu (takıntılı ve takıntısız) kullanılarak farklı hücum açılarında manevra performansı tahmin edilmeye çalışılmıştır (Vaz vd., 2010). Kullanılan türbülans modellerindeki farklılıkların sonuçlar üzerindeki etkisi tartışılmış ve takıntıların hidrodinamik kuvvetleri nasıl etkilediği iki farklı viskoz HAD çözücüsü kullanılarak incelenmiştir. Sonuç olarak tamamen batmış cisimlerin manevra performansını tahmin ederken genellikle, DARPA Suboff modelinin farklı konfigürasyonlarının kullanıldığı ve manevra katsayılarının yanısıra dip etkisi ve serbest su yüzeyi etkisinin hidrodinamik kuvvetler ve moment üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca, tamamen batmış bir cisme etkiyen kuvvetlerin büyük bir bölümünü sürtünme kuvveti oluşturduğu için farklı türbülans modellerinin sonuçlar üzerindeki etkisi de incelenen diğer konular arasındadır.

Manevra performansının gemi tipine göre (tek gövdeli gemiler, çift gövdeli gemiler ve denizaltılar) incelendiği çalışmalar özetlenecek olursa, çalışmaların birçoğunda manevra katsayıları sayısal veya deneysel yöntemlerle elde edilmeye çalışılmıştır. Çünkü yüzen bir cismin manevra performansının belirlenebilmesi için yatay (ve düşey) düzlemdeki hareket denklemlerinin doğru bir şekilde çözülmesi gerekmektedir. Bu denklemleri doğru bir şekilde çözebilmek de doğrudan manevra katsayılarının hassas bir şekilde hesaplanmasına bağlıdır. Bunun haricinde çalışmaların birçoğunda manevra katsayılarının tahminini etkileyen iç etkenler (gemi formu, dümen ve pervane sayısı, ölçek etkisi gibi) ve dış etkenler (sığ su, dar kanal, dalgalı durum gibi) inceleme konusu olmuştur. Yapılmış olan araştırmaların büyük kısmında test (referans-benchmark) gemi modelleri (KCS, KVLCC, DTMB, HTC, DTC, S-175, ESSO OSAKA, WIGLEY, DELFT372 gibi) veya denizaltı modeli (DARPA SUBOFF gibi) kullanılmıştır. Çalışmalarda genellikle bu modellerin kullanılma nedeni ise ilk olarak tasarlandıkları araştırma merkezleri tarafından optimize edilerek akıma uyumlu (streamlined) birer form haline getirilmiş olmalarıdır.

3. Matematik modelin oluşturulması

Gemi manevraları ile ilgili matematiksel bir model ortaya koyabilmek için öncelikle eksen takımlarının doğru bir şekilde belirlenmesi gerekir. Manevra yapan bir gemi için sabit ($O_0-x_0y_0z_0$) ve bağlı ($o-xyz$) eksen takımları olmak üzere iki farklı koordinat sistemi tanımlanmıştır. Sabit eksen takımının orijini genellikle manevra hareketinin başladığı nokta kabul edilirken bağlı eksen takımının orijini geminin ortası (midship) ya da ağırlık merkezi (LCG) olarak kabul edilir. Yasukawa ve Yoshimura (2014) yapmış oldukları çalışmada, bağlı eksen takımında orijin noktasının yükleme durumuna göre geminin ağırlık merkezinin konumu değişebileceğinden ötürü gemi ortasında alınmasının daha uygun olacağını belirtmişlerdir.

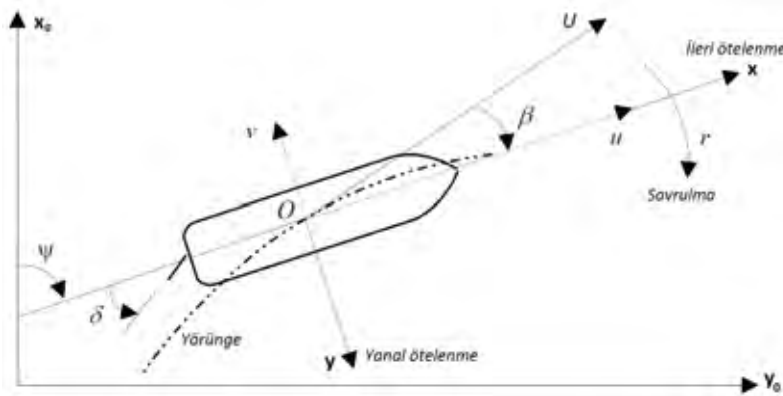
3.1. Lineer hareket denklemlerinin elde edilmesi

Su yüzeyi üzerinde seyreden geleneksel bir gemi formunun manevra kabiliyeti genellikle üç serbestlik dereceli (3SD) olarak incelenir. En çok kullanılan ve en temel matematiksel model, yalnızca geminin yatay düzlemdeki hareketlerinin hesaplara dâhil edildiği modeldir ve bu modelde ileri öteleme, yan öteleme ve savrulma hareketleri incelenir (bkz Şekil 2).

Sabitlenmiş koordinat sisteminde geminin karşılaştığı x_0 yönündeki kuvvet X_0 , y_0 yönündeki kuvvet Y_0 ve savrulmada karşılaşılan moment N ile temsil edilirse, Newton'un ikinci hareket yasası kullanılarak aşağıdaki denklemler yazılabilir:

$$\begin{aligned} X_0 &= m\ddot{x}_G \\ Y_0 &= m\ddot{y}_G \\ N &= I_Z\dot{r} \end{aligned} \quad [1]$$

Burada \ddot{x}_G , x_0 doğrultusundaki ivme; \ddot{y}_G , y_0 doğrultusundaki ivme ve \dot{r} ($\dot{\psi}$) ise z doğrultusundaki açısal ivmedir. x_G ve y_G geminin ağırlık merkezinin konumu ve ψ gemi koordinat sistemiyle sabitlenmiş koordinat sisteminin yaptığı açıdır. m geminin deplasman kütlesi, I_Z ise z eksenini doğrultusunda geminin ağırlık merkezinden alınan atalet momentidir.



Şekil 2. Manevra yapan bir gemi için sabit ($o_0-x_0y_0z_0$) ve bağlı ($o-xyz$) eksen takımları.

Sabitlenmiş koordinat sistemindeki kuvvetler dönüşüm matrisi kullanılarak gemiye bağlı koordinat sistemine çevrilirse (orijinin iki koordinat sistemi için farklı noktada olduğu düşünülerek):

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

denklem takımı elde edilir. Gemi üzerindeki X ve Y kuvvetleri ile N momentini Taylor serisine açılıp, yalnızca lineer terimler alınarak denklemler yeniden düzenlendiğinde,

$$\begin{aligned} -X_u(u - U) + (m - X_{\dot{u}})\dot{u} &= 0 \\ -vY_v + \dot{v}(m - Y_{\dot{v}}) - r(Y_r - mU) - \dot{r}(Y_{\dot{r}} - m x_G) &= 0 \\ -vN_v - \dot{v}(N_{\dot{v}} - m x_G) - r(N_r - m x_G U) - \dot{r}(N_{\dot{r}} - I_Z) &= 0 \end{aligned} \quad [3]$$

manevra için lineer hareket denklemleri elde edilir. Burada alt indisler, ilgili kuvvet ya da momentin (X, Y, N) bağlı koordinat sistemindeki hız ve ivmelere ($u, v, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{r}$) göre olan değişimini yani kısmi türevi olduğunu belirtmektedir. [3] no.'lu denklem takımı geminin yalnızca çıplak teknesi etrafındaki hidrodinamik kuvvetleri gözetken lineer bir hareket denklemdir. Pervane, dümen vb. gibi takıntıların etkisi veya dalga, akıntı, rüzgar gibi çevresel faktörler bu denklem sisteminde yer almamaktadır.

Tablo 1. [3] no.'lu denklem takımının boyutsuzlaştırılmasında kullanılan ifadeler.

$m' = \frac{m}{\frac{\rho}{2}L^3}$	$v' = \frac{v}{U}$	$\dot{v}' = \frac{\dot{v}L}{U^2}$	$I'_z = \frac{I_z}{\frac{\rho}{2}L^5}$	$r' = \frac{rL}{U}$	$\dot{r}' = \frac{\dot{r}L^2}{U^2}$	$Y'_v = \frac{Y_v}{\frac{\rho}{2}L^2U}$
$Y'_r = \frac{Y_r}{\frac{\rho}{2}L^3U}$	$N'_{v'} = \frac{N_v}{\frac{\rho}{2}L^3U}$	$N'_{r'} = \frac{N_r}{\frac{\rho}{2}L^4U}$	$Y'_{\dot{v}} = \frac{Y_{\dot{v}}}{\frac{\rho}{2}L^3}$	$Y'_{\dot{r}} = \frac{Y_{\dot{r}}}{\frac{\rho}{2}L^4}$	$N'_{\dot{v}} = \frac{N_{\dot{v}}}{\frac{\rho}{2}L^4}$	$N'_{\dot{r}} = \frac{N_{\dot{r}}}{\frac{\rho}{2}L^5}$

[3] no.'lu denklem takımında en üstte verilen denklem geminin yalnızca ileri öteleme hareketini modeller ve aslında manevra probleminden daha çok bir gemi direnci problemidir. Ancak, aynı denklem takımındaki ikinci ve üçüncü denklemlerde yatay hız ve açılal hız birbiri içerisine geçmiştir. Dolayısıyla gemi manevra kabiliyetini incelemek için bu iki denklemin birlikte çözülmesi gerekir. Tablo 1'deki boyutsuz ifadeler kullanılarak lineer hareket denklemleri boyutsuzlaştırılırsa,

$$\begin{aligned} -v'Y'_v + \dot{v}'(m' - Y'_{\dot{v}}) - r'(Y'_r - m') - \dot{r}'(Y'_{\dot{r}} - m'x'_G) &= 0 \\ -v'N'_{v'} - \dot{v}'(N'_{\dot{v}} - m'x'_G) - r'(N'_{r'} - m'x'_G) - \dot{r}'(N'_{\dot{r}} - I'_z) &= 0 \end{aligned} \quad [4]$$

elde edilecektir. Manevra katsayılarının boyutsuzlaştırılması Tablo 1'de görüldüğü haliyle yapılabileceği gibi kuvvet-moment ve hız-ivme terimlerinin ayrı ayrı boyutsuzlaştırılmasıyla da elde edilebilir (SNAME, 1950). Eğer bu iki denklemde yer alan manevra türevleri daha önceden sayısal veya deneysel yöntemlerle elde edilmişse, [4] no.'lu denklem sistemi için bilinmeyenler zamana göre değişen boyutsuz yanal ötelenme hızı (v') ve açılal hızdır (r'). İvme terimleri ise (\dot{v}', \dot{r}') bilinmeyen değişkenlerin türevlerini ifade ettiği için [4] no.'lu denklem takımı bir diferansiyel denklem sistemi halini alır. [4] no.'lu denklem takımında verilen lineer hareket denklemleri yalnızca geminin takıntısız hali için geçerlidir. Ancak, geleneksel forma sahip bir gemiye istenen rotanın verilebilmesi ancak dümen sayesinde mümkün olabilir. Dümen kuvvetlerinin lineer hareket denklemlerine eklenebilmesi için [4] no.'lu denklem takımında eşitliklerin sağ taraflarına sırasıyla $Y'_\delta \delta_R$ ve $N'_\delta \delta_R$ terimleri eklenir.

$$\begin{aligned} -v'Y'_v + \dot{v}'(m' - Y'_{\dot{v}}) - r'(Y'_r - m') - \dot{r}'(Y'_{\dot{r}} - m'x'_G) &= Y'_\delta \delta_R \\ -v'N'_{v'} - \dot{v}'(N'_{\dot{v}} - m'x'_G) - r'(N'_{r'} - m'x'_G) - \dot{r}'(N'_{\dot{r}} - I'_z) &= N'_\delta \delta_R \end{aligned} \quad [5]$$

Lineer hareket denklemlerini incelemek adına $Y'_\delta \delta_R$ ve $N'_\delta \delta_R$ terimleri de aslında lineerleştirilmiş terimlerdir. Dolayısıyla [5] no.'lu denklem takımıyla geminin ancak küçük dümen açılarındaki manevra kabiliyetinin incelenebileceği unutulmamalıdır. [5] no.'lu denklem sistemi iki vektörün eşitliği olarak yazılacak olursa matris formatında,

$$\begin{pmatrix} -v'Y'_v + \dot{v}'(m' - Y'_{\dot{v}}) - r'(Y'_r - m') - \dot{r}'(Y'_{\dot{r}} - m'x'_G) \\ -v'N'_{v'} - \dot{v}'(N'_{\dot{v}} - m'x'_G) - r'(N'_{r'} - m'x'_G) - \dot{r}'(N'_{\dot{r}} - I'_z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y'_\delta \delta_R \\ N'_\delta \delta_R \end{pmatrix} \quad [6]$$

elde edilir. [6] no.'lu denklemde eşitliğin sol tarafı iki ayrı vektör olarak gösterilebilir. İlk kısım ivme terimlerini, ikinci kısım da hız terimlerini içerecek şekilde düzenlenirse,

$$\begin{pmatrix} \dot{v}'(m' - Y'_{\dot{v}}) - \dot{r}'(Y'_{\dot{r}} - m'x'_G) \\ \dot{r}'(I'_z - N'_{\dot{r}}) - \dot{v}'(N'_{\dot{v}} - m'x'_G) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -v'Y'_v - r'(Y'_r - m') \\ -r'(N'_{r'} - m'x'_G) - v'N'_{v'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y'_\delta \delta_R \\ N'_\delta \delta_R \end{pmatrix} \quad [7]$$

elde edilir. [7] no.'lu denklemde eşitliğin sol tarafında yer alan her iki vektör hız ve ivme vektörleri ile çarpılacak şekilde düzenlenirse iki adet matris-vektör çarpımı elde edilecektir.

$$\begin{pmatrix} (m' - Y'_{\dot{v}}) & -(Y'_{\dot{r}} - m'x'_G) \\ -(N'_{\dot{v}} - m'x'_G) & (I'_z - N'_{\dot{r}}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{v}' \\ \dot{r}' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -Y'_v & -(Y'_r - m') \\ -N'_{v'} & -(N'_{r'} - m'x'_G) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v' \\ r' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y'_\delta \delta_R \\ N'_\delta \delta_R \end{pmatrix} \quad [8]$$

[8] no.'lu denklemin daha sade bir gösterimi için aşağıdaki semboller kullanılabilir.

$$B = \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (m' - Y'_v) & -(Y'_r - m'x'_G) \\ -(N'_v - m'x'_G) & (I'_Z - N'_r) \end{pmatrix} \quad [9]$$

$$C = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -Y'_v & -(Y'_r - m') \\ -N'_v & -(N'_r - m'x'_G) \end{pmatrix} \quad [10]$$

Denklem sistemi son haliyle tekrar yazılacak olursa,

$$\begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{v}' \\ \dot{r}' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v' \\ r' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y'_\delta \delta_R \\ N'_\delta \delta_R \end{pmatrix} \quad [11]$$

elde edilmiş olur. [11] no.'lu denklem sistemi daha kapalı bir formda aşağıdaki gibi yazılırsa denklem

$$B \cdot \dot{\vec{X}} + C \cdot \vec{X} = \vec{F} \quad [12]$$

halini alır.

Diferansiyel denklem sistemlerinin çözümünde standart (Cauchy) yöntemini kullanabilmek için ivme vektörü açık olarak (explicit) ifade edilmelidir, dolayısıyla diğer tüm terimler eşitliğin sağ tarafına geçirilir.

$$B \cdot \dot{\vec{X}} = -C \cdot \vec{X} + \vec{F} \quad [13]$$

[13] no.'lu denklemde eşitliğin her iki tarafı B matrisinin tersi (B^{-1}) ile çarpılırsa,

$$B^{-1}B \cdot \dot{\vec{X}} = -B^{-1}C \cdot \vec{X} + B^{-1}\vec{F} \quad [14]$$

elde edilmiş olur. B matrisinin tersiyle çarpılmasıyla eşitliğin sol tarafında birim matris elde edilir ve ivme vektörü yalnız bırakılır. Böylece diferansiyel denklem sistemi standart (Cauchy) formda son halini almış olur.

$$\dot{\vec{X}} = A \cdot \vec{X} + \vec{H} \quad [15]$$

Burada A matrisi "Katsayılar Matrisi" olarak adlandırılır. \vec{H} vektörü ise dümen hareketini temsil etmektedir.

$$A = -B^{-1}C; \vec{H} = B^{-1}\vec{F} \quad [16]$$

B matrisinin tersi,

$$B^{-1} = \frac{1}{\det(B)} \begin{pmatrix} B_{22} & -B_{12} \\ -B_{21} & B_{11} \end{pmatrix} \quad [17]$$

olarak ifade edilir. Sonuç olarak [15] no.'lu diferansiyel denklem sistemindeki A katsayılar matrisi ve dümen hareketini temsil eden \vec{H} vektörü aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\begin{aligned} A &= -\frac{1}{B_{11}B_{22}-B_{12}B_{21}} \begin{pmatrix} -B_{22} & B_{12} \\ B_{21} & -B_{11} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{pmatrix} \\ &= -\frac{1}{B_{11}B_{22}-B_{12}B_{21}} \begin{pmatrix} -(C_{11}B_{22} + B_{12}C_{21}) & -(C_{12}B_{22} + B_{12}C_{22}) \\ -C_{11}B_{21} + B_{11}C_{21} & -C_{12}B_{21} + B_{11}C_{22} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad [18]$$

$$\vec{H} = -\frac{\delta_R}{B_{11}B_{22}-B_{12}B_{21}} \begin{pmatrix} B_{22}Y_\delta - B_{12}N_\delta \\ -B_{21}Y_\delta + B_{11}N_\delta \end{pmatrix} \quad [19]$$

3.2. Lineer olmayan hareket denklemlerinin elde edilmesi

Lineer hareket denklemleri için yukarıda (Bölüm 3.1' de) [2] no.'lu denklem takımındaki X ve Y kuvvetleri ile N momenti Taylor serisine açılarak yalnızca birinci dereceden türevler alınmış ve daha yüksek dereceden türevler ihmal edilerek [3] no.'lu denklem elde edilmişti. Taylor serisine açılan X , Y ve N 'nin daha yüksek mertebedeki türevleri de [2] no.'lu denklemin sol tarafına eklenirse lineer olmayan hareket denklemleri elde edilir. Örneğin, iki parametreye bağlı bir $f[x, y]$ fonksiyonunun (a, b) noktası etrafındaki birinci dereceden Taylor serisi açılımı;

$$f(x, y) = f(a, b) + (x - a)f_x(a, b) + (y - b)f_y(a, b) \quad [20]$$

olarak verilir. Aynı fonksiyonun aynı nokta etrafındaki daha yüksek dereceden açılımları ise;

$$\begin{aligned} f(x, y) = & f(a, b) + (x - a)f_x(a, b) + (y - b)f_y(a, b) \\ & + \frac{1}{2!} [[x - a]^2 f_{xx}(a, b) + 2(x - a)(y - b)f_{xy}(a, b) \\ & + [y - b]^2 f_{yy}(a, b)] + \frac{1}{6}(\dots) + R_3 \end{aligned} \quad [21]$$

olarak verilir. Taylor serisinde arzu edilen dereceye kadar bileşen alınabilir. Dolayısıyla lineer olmayan hareket denklemleri için ne kadar yüksek hassasiyet isteniyorsa Taylor serisi açılırken o kadar ileri gidilmelidir. Ancak gemilerde iskele-sancak simetrisi olmasından dolayı r, v ve δ 'nın, X kuvveti için Taylor serisi açılırken tek dereceli tüm terimleri, Y kuvveti ve N momenti için ise çift dereceli olan tüm terimleri sıfıra eşit olur (Eloot, 2006). Böylece düşük hızlar için lineer olmayan hareket denklemlerinin üçüncü dereceden Taylor serisi açılımı şu şekilde ifade edilebilir:

$$\begin{aligned} X = & X_0 + X_u \Delta u + \frac{1}{2} X_{uu} \Delta u^2 + \frac{1}{6} X_{uuu} \Delta u^3 + \frac{1}{2} X_{vv} v^2 + \left(\frac{1}{2} X_{rr} + mx_G \right) r^2 + \frac{1}{2} X_{\delta\delta} \delta^2 \\ & + (X_{vr} + m)vr + X_{v\delta} v\delta + X_{r\delta} r\delta + \frac{1}{2} X_{vuu} v^2 \Delta u + \frac{1}{2} X_{rru} r^2 \Delta u \\ & + \frac{1}{2} X_{\delta\delta u} \delta^2 \Delta u + X_{r\delta u} r\delta \Delta u + X_{rvu} rv \Delta u + X_{v\delta u} v\delta \Delta u + X_{r\delta v} r\delta v \end{aligned} \quad [22]$$

$$\begin{aligned} Y = & Y_0 + Y_u \Delta u + Y_{uu} \Delta u^2 + Y_v v + (Y_r - mU)r + Y_\delta \delta + Y_{\delta u} \delta \Delta u + Y_{vu} v \Delta u + Y_{ru} r \Delta u \\ & + \frac{1}{2} Y_{vuu} v \Delta u^2 + \frac{1}{2} Y_{ruu} r \Delta u^2 + \frac{1}{2} Y_{\delta uu} \delta \Delta u^2 + \frac{1}{6} Y_{vvv} v^3 + \frac{1}{6} Y_{rrr} r^3 \\ & + \frac{1}{6} Y_{\delta\delta\delta} \delta^3 + \frac{1}{2} Y_{rr\delta} r^2 \delta + \frac{1}{2} Y_{vrr} vr^2 + \frac{1}{2} Y_{rvv} rv^2 + \frac{1}{2} Y_{\delta vv} \delta v^2 \\ & + Y_{vr\delta} vr\delta + \frac{1}{2} Y_{\delta\delta r} \delta^2 r + \frac{1}{2} Y_{\delta\delta v} \delta^2 v \end{aligned} \quad [23]$$

$$\begin{aligned} N = & N_0 + N_u \Delta u + N_{uu} \Delta u^2 + N_v v + (N_r - mx_G U)r + N_\delta \delta + N_{\delta u} \delta \Delta u + N_{vu} v \Delta u \\ & + N_{ru} r \Delta u + \frac{1}{2} N_{vuu} v \Delta u^2 + \frac{1}{2} N_{ruu} r \Delta u^2 + \frac{1}{2} N_{\delta uu} \delta \Delta u^2 + \frac{1}{6} N_{vvv} v^3 \\ & + \frac{1}{6} N_{rrr} r^3 + \frac{1}{6} N_{\delta\delta\delta} \delta^3 + \frac{1}{2} N_{rr\delta} r^2 \delta + \frac{1}{2} N_{vrr} vr^2 + \frac{1}{2} N_{rvv} rv^2 \\ & + \frac{1}{2} N_{\delta vv} \delta v^2 + N_{vr\delta} vr\delta + \frac{1}{2} N_{\delta\delta r} \delta^2 r + \frac{1}{2} N_{\delta\delta v} \delta^2 v \end{aligned} \quad [24]$$

Burada $\Delta u = u - U$ değerine eşittir. Abkowitz modeli olarak bilinen bu denklem sisteminde Y_v, N_v, N_r lineer manevra türevlerinin taktik çap, ilerleme, transfer, aşırı sapma açısı, doğrusal rota stabilitesi

gibi bazı manevra performans parametreleri üzerinde güçlü etkisi bulunmaktadır. N_δ , N_{vvr} , $N_{vv\delta}$ türevlerinin aşırı sapma açısı üzerinde herhangi bir etkisi yoktur. Lineer olmayan Y_{vvr} , $Y_{vv\delta}$, $N_{\delta\delta v}$ katsayıları özellikle dönme manevrasını (taktik çap) önemli ölçüde etkilemektedir. Yanal ivmeye bağlı olan lineer $N_{\dot{v}}$ türevinin sadece zigzag testinden elde edilen aşırı sapma açısı üzerinde etkisi vardır. Lineer olmayan X_{vv} , Y_{vvv} , $Y_{\delta\delta\delta}$, $Y_{\delta\delta v}$, N_{vvv} , $N_{\delta\delta\delta}$ türevlerinin ise bahsedilen manevra performans parametreleri üzerinde hiçbir etkisi bulunmamaktadır (Obreja, 2010). Fakat bahsedilen tüm bu türevlerin bazı manevra performans parametreleri üzerinde az ya da çok etkisinin bulunması bu katsayıların denklem sistemi içerisinde her zaman ihmal edilebileceği anlamına gelmemektedir.

3.3. Matematik model

Günümüzde, gemilerin manevra modellemeleri ile ilgili yapılan yeni yaklaşımlardaki asıl amaç, oluşturulan matematik modelin olabildiğince kapsayıcı olmasını sağlamaktır. Oluşturulan modeli olabildiğince basit tutarak değişik alanlardan kullanıcıların bu matematik modeli kendi problemlerine uygulayabilmelerine ve gerektiğinde kendi sonuçlarıyla karşılaştırabilmelerine olanak sağlamaktır. Matematik modelin doğruluğu ve hassaslığı, büyük ölçüde deneysel veya teorik yöntemlerle elde edilen hidrodinamik türev değerlerine bağlı olduğundan, manevra katsayılarının elde edildiği ölçülmüş kuvvet ve moment değerlerindeki doğruluk oranı problemin çözümünü doğrudan etkilemektedir. Bu yüzden çalışmalarda elde edilen kuvvet ve moment değerleri gibi işlenmemiş verilerin paylaşılması da izlenen bir yoldur.

Matematik modeller, lineer olmayan hareket denklemlerinin belirli bir dereceye kadar Taylor serisine açılmasıyla geliştirilmiştir. Araştırmacılar bu modelleri kullanarak gemilerin manevra performanslarını çeşitli testler (dönme, zigzag, durma, çıkış, spiral) ile belirleyebilmektedir. Manevra performans hesaplamaları ile ilgili literatürde yer alan çalışmalarda genellikle daha önceden önerilmiş iki farklı matematik modelden birisi tercih edilmektedir; ilk modelde Abkowitz (1964), gemiyi bir bütün olarak ele alıp hız ve dümen açısına bağlı terimleri üçüncü dereceden Taylor serisine açarak hidrodinamik kuvvetler ve momentler için lineer olmayan bir yaklaşım önermiştir.

$$\begin{aligned}
 (m - X_{\dot{u}})\dot{u} &= f_1(u, v, r, \delta) \\
 (m - Y_{\dot{v}})\dot{v} + (m x_G - Y_{\dot{r}})\dot{r} &= f_2(u, v, r, \delta) \\
 (m x_G - N_{\dot{v}})\dot{v} + (I_z - N_{\dot{r}})\dot{r} &= f_3(u, v, r, \delta)
 \end{aligned} \tag{25}$$

[25] no.'lu denklem takımında eşitliklerin sağ tarafında yer alan fonksiyonların açılımları [22], [23] ve [24] no.'lu denklemlerde gösterilmiştir. Bu matematiksel açılım literatürde Abkowitz modeli olarak bilinmektedir. Bu modelde geminin simetrik bir geometri olmasından ötürü birçok manevra katsayısı ihmal edilmekte ve çözülmesi gereken denklemler daha sade bir hal almaktadır. Abkowitz (1964) önermiş olduğu matematik modelde aşağıdaki varsayımları göz önünde bulundurarak gerekli sadeleştirmeleri yapmıştır (Fossen, 2011):

- Geminin ilerleme hızının zamana bağlı olarak değişmediği kabul edilmiştir.
- Sadece birinci mertebeden ivme terimleri modele dahil edilmiştir.
- Geminin simetri özelliğinden dolayı bazı terimler ihmal edilmiştir.
- Hız ve ivme terimleri arasında bir etkileşim olmadığı kabulü yapılmıştır.

Pervane etkisi denklemlerde açık olarak yer almasa bile u hızı yerine $(u - U)$ yazılarak pervane etkisi hareket denklemlerine dahil edilmiştir. Abkowitz modeli literatürde yer alan birçok çalışmada kullanılmıştır (Obreja vd., 2010; Cura-Hochbaum, 2011; Mucha ve Moctar, 2015; Yoon vd., 2015; Hajivand ve Mousavizdegan, 2015).

Diğer matematik model ise aşağıdaki [26] no.'lu denklemde görüldüğü üzere hidrodinamik kuvvetler ve savrulma momentini tekne, pervane ve dümen üzerinde ayrı olarak ele alan ve Abkowitz modelinden farklı olarak bunların birbirleriyle etkileşimlerini de hesaba katan modüler tipteki MMG modelidir (Ogawa ve Kasai, 1978). Bu model aşağıdaki varsayımlar göz önünde bulundurularak oluşturulmuştur (Yasukawa ve Yoshimura, 2015):

- Gemiye etkiyen hidrodinamik kuvvetlerin zamana bağlı olarak değişmediği (quasi-steady) varsayılmıştır.
- Yanal ötelenme hızının (v) ileri ötelenme hızına (u) kıyasla çok küçük olduğu kabulü yapılmıştır.
- Gemi hızının sabit ve yüksek dalga direnci oluşturmayacak mertebede olması gerekmektedir.
- Metasantr yüksekliğinin (GM) yeterli genişlikte olması gerekmektedir. Ayrıca yalpa hareketinin manevra performansı üzerindeki etkisi ihmal edilmiştir.

MMG modelinde bir gemiye manevra esnasında etkiyen kuvvetler ve moment şu şekilde ayrıştırılır:

$$\begin{aligned} X &= X_H + X_R + X_P \\ Y &= Y_H + Y_R \\ N &= N_H + N_R \end{aligned} \quad [26]$$

Burada H,R ve P indisleri sırasıyla tekne, dümen ve pervaneyi göstermektedir. Tekneye etkiyen hidrodinamik kuvvetler ve savrulma momenti,

$$\begin{aligned} X_H &= (1/2)\rho L_{pp} dU^2 X_H'(v', r') \\ Y_H &= (1/2)\rho L_{pp} dU^2 Y_H'(v', r') \\ N_H &= (1/2)\rho L_{pp}^2 dU^2 N_H'(v', r') \end{aligned} \quad [27]$$

olarak ifade edilir. Burada v' boyutsuz yanar hızı (v/U), r' ise boyutsuz açısal hızı (rL_{pp}/U) göstermektedir. X_H' kuvveti, toplam direnç katsayısının (R'_0) ve v' ile r' 'nin ikinci ve dördüncü mertebeden polinom fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Y_H' ve N_H' ise v' ile r' 'nin birinci ve üçüncü mertebeden polinom fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:

$$\begin{aligned} X_H'(v', r') &= -R'_0 + X'_{vv}v'^2 + X'_{vr}v'r' + X'_{rr}r'^2 + X'_{vvvv}v'^4 \\ Y_H'(v', r') &= Y'_v v' + Y'_R r' + Y'_{vvv}v'^3 + Y'_{vvr}v'^2 r' + Y'_{vrr}v' r'^2 + Y'_{rrr}r'^3 \\ N_H'(v', r') &= N'_v v' + N'_R r' + N'_{vvv}v'^3 + N'_{vvr}v'^2 r' + N'_{vrr}v' r'^2 + N'_{rrr}r'^3 \end{aligned} \quad [28]$$

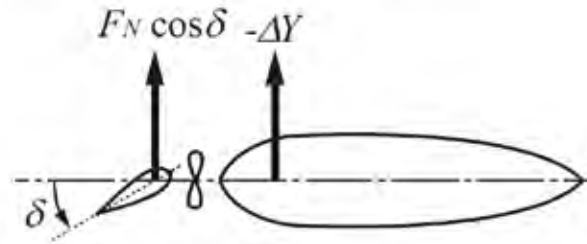
Diğer bir kuvvet bileşeni olan pervane kaynaklı ileri öteleme kuvveti ise,

$$X_P = (1 - t_p)T \quad [29]$$

olarak ifade edilir. Burada T itme, t_P ise itme azalması katsayısıdır. Dümene etkisi burada dahil edilmemiş olup aşağıda gösterildiği gibi X_R, Y_R, N_R olarak ayrıca ele alınmıştır.

$$\begin{aligned} X_R &= -(1 - t_R)F_N \sin \delta \\ Y_R &= -(1 + a_H)F_N \cos \delta \\ N_R &= -(x_R + a_H x_H)F_N \cos \delta \end{aligned} \quad [30]$$

Burada F_N kuvveti dümene yüzey normali yönünde etkiyen kuvvettir. Şekil 3'te F_N kuvvetinin yatay bileşeni ve bu bileşenin tekneye etkiyen yanal öteleme kuvvetine (Y) olan etkisi gösterilmiştir. [30] no.'lu denklemde yer alan t_R dümene direnci azalma katsayısını, a_H dümene kuvveti artış faktörünü, x_R dümene tekne üzerindeki boyuna konumunu ve x_H ek yanal kuvvet bileşeninin konumunu göstermektedir. a_H teriminin deneysel çalışmalar sonucunda yaklaşık 0.3-0.4 olarak hesaplandığı, x_H değerinin ise yaklaşık $-0.45L_{pp}$ büyüklüğünde olduğu belirtilmiştir (Yasukawa ve Yoshimura, 2015). Her bir terimin elde edilme yöntemi Yasukawa ve Yoshimura (2015)' de ayrıntılı olarak verilmiştir. Araştırmacılar tarafından sıklıkla kullanılan bu iki farklı matematik modelden (Abkowitz ve MMG) hangisinin daha doğru ve hassas sonuçlar verdiği ile ilgili şu ana kadar kesin bir şey söylenmemiştir.



Şekil 3. Dümene yüzey normali yönünde etkiyen kuvvetin yatay bileşeni ve bu bileşenin tekneye etkiyen yanal kuvvette (Y) oluşturduğu değişim (Yasukawa ve Yoshimura, 2015).

SHT'ler ile gerçekleştirilen dönme ve zigzag manevralarının matematik modeller kullanılarak sayısal olarak da hesaplanması mümkündür. İncelenen bir gemiye ait manevra türevleri belirli bir hızda sayısal veya deneysel olarak bir defa elde edildikten sonra [25] no.'lu denklemde gösterilen ve diferansiyel denklem formatında olan hareket denklemleri "Runge-Kutta" veya "Euler" gibi sayısal integrasyon yöntemleriyle çözülerek her bir zaman adımı için $u(t)$, $v(t)$ ve $r(t)$ hızları elde edilir. Daha sonra elde edilen hızlar tekrar integre edilerek geminin o anki konumları ve pruva açısı,

$$\begin{aligned} x(t) &= \int_0^t [u(t) \cos \psi(t) - v(t) \sin \psi(t)] dt \\ y(t) &= \int_0^t (u(t) \sin \psi(t) + v(t) \cos \psi(t)) dt \\ \psi(t) &= \int_0^t r(t) dt \end{aligned} \quad [31]$$

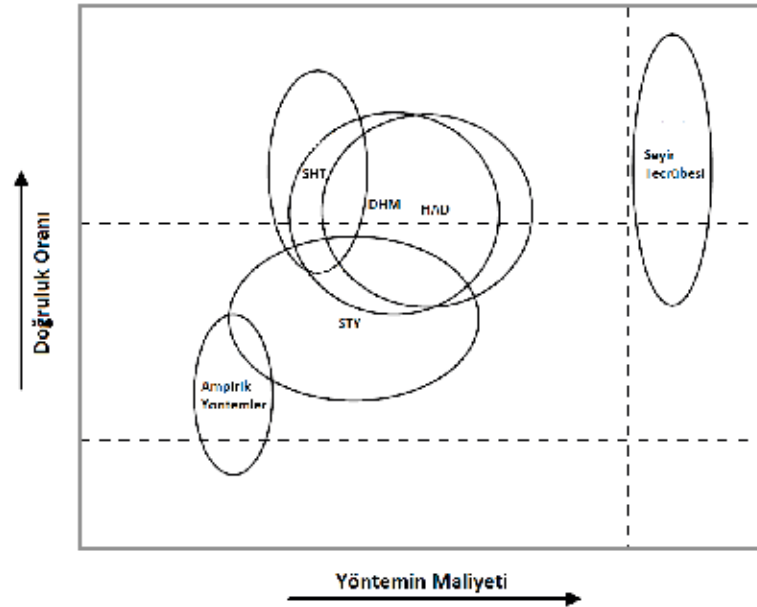
elde edilmiş olur.

4. Manevra performansı hesaplama yöntemleri

Manevra türevleri, diğer adıyla hidrodinamik katsayılar, bir geminin manevra performansını belirleyebilmek için bilinmesi gereken değişkenlerdir. Başka bir deyişle bu değişkenler, gemiye seyir tecrübesi ya da serbest hareketli model testi yaptırılmadıysa, dönme yarıçapı, taktik çap, ilerleme, transfer ve aşırı sapma açısı gibi manevra performansına ait özellikleri belirleyebilmek için kullanılan matematik model içerisindeki bilinmeyen parametrelerdir. [32] no.'lu denklemde görüleceği gibi manevra türevleri, gemi üzerinde oluşan hidrodinamik kuvvetler veya savrulma momentinin bağlı eksen takımındaki hız veya ivmelere göre değişimini ifade eder;

$$\frac{\partial(X, Y, N)}{\partial(u, \dot{u}, v, \dot{v}, r, \dot{r})} \quad [32]$$

Hidrodinamik katsayılar geminin formuna ve ilerleme hızına (U) bağlı olarak değişir. Bundan dolayı manevra türevleri genellikle gemilerin servis hızlarına karşılık gelen hızlarda, sayısal ya da deneysel çalışmalar yapılarak belirlenir. Manevra türevleri, hidrodinamik kuvvetler veya momentin yerel hız ya da ivmeye göre değişimini ifade ettiği için çok küçük mertebelerdedirler ve manevra performansının doğru bir şekilde belirlenebilmesi için bu türevlere ait hesapların yüksek hassasiyetle yapılması gerekir. Aksi takdirde geminin manevra performansı doğru bir şekilde belirlenemez. Manevra performansı belirlenirken kullanılan yöntemlerin uygulanmasındaki maliyete karşılık elde edilen doğruluk oranları SIMMAN 2008 çalıştayında belirlenmiştir (ITTC-Maneuvering Committee, 2008). Şekil 4'te gösterilen doğruluk oranları kesinlik arzetmemekle birlikte farklı enstitülerin belirli bir yöntem ve gemi modeline göre olan tecrübelerine dayanılarak belirlenmiştir.



Şekil 4. Ampirik, sayısal ve deneysel yöntemlerin manevra performansı tahminlerindeki doğruluk oranları (ITTC-Maneuvering Committee, 2008).

Gemilerin manevra performanslarını belirleyebilmek için literatürde yer alan çalışmalarda genellikle dört farklı yöntem kullanılmıştır. Birincisi, ön dizayn aşamasında hızlı ve pratik olması nedeniyle kullanılan ampirik-yarı ampirik ifadeler, ikincisi lineer olmayan etkilerin de doğası gereği probleme dahil edildiği ve genellikle en güvenilir sonuçların alındığı deneysel yöntemler, üçüncüsü deneysel yöntemle elde edilmesi zor olan ve tekne etrafındaki hız, basınç, girdap vb. alanlarının görsel olarak

incelenebildiği sayısal yöntemlerdir. Dördüncü yöntem ise son yıllarda popülerliği gittikçe artan ve sonuçların daha hızlı alınabildiği Sistem Tanılama Yöntemleridir (STY). İstatistiksel teoriyi temel alan bu yöntemde deneysel veya sayısal olarak elde edilmiş anlık sonuçlar kullanılarak manevra katsayıları daha kısa sürede hesaplanabilmektedir.

4.1. Ampirik/Yarı Ampirik Yöntemler

Ampirik ve yarı-ampirik yöntemler genellikle ön dizayn aşamasında deney ve tecrübe seferlerine dayalı olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemler genellikle geminin ana boyutları ve tekne form özelliklerinin bir fonksiyonu olacak şekilde ifade edilirler. Yarı ampirik ifadeler geminin dönme manevrası veya doğrusal rota kabiliyeti hakkında sadece yüzeysel bilgi verir ve bundan dolayı hassasiyetleri düşüktür. Bu tür ifadeleri kullanırken yöntemin kullandığı sınırlar içerisinde kalmaya oldukça dikkat edilmelidir. Aksi takdirde hatalı sonuç elde etme riski yüksektir. Şekil 5'te gösterilen manevra türevleri elde edilirken geminin ana boyutları cinsinden ifade edilen formüller kullanılmıştır. Bu formüllerde kullanılan temel yaklaşımlar genellikle dilim teorisi, yarı ampirik metotlar veya çoklu regresyon analizleridir (Wagner Smitt, 1971, Norrbın, 1970, Clarke vd., 1982, Inoue vd. 1981). Regresyon analizleri, iki ya da daha çok değişken arasındaki ilişkiyi ölçmek için kullanılan bir analiz metodudur. Eğer tek bir değişken kullanılarak analiz yapılıyorsa buna tek değişkenli regresyon, birden çok değişken kullanılıyorsa çoklu regresyon analizi adı verilir. Bu yöntem manevra katsayılarını tekne ana boyutları cinsinden ifade eden formüllerin elde edilebilmesine olanak sağlar ancak yine de elde edilen sonuçlar genellikle tatmin edici olmamaktadır. Geniş aralığa sahip formülasyonların türetildiği çalışmalarda istenilen derecede doğru sonuçlar elde edilebilmesi için çok fazla sayıda verinin kullanılması gereklidir. Bu da hem zaman hem de maliyet açısından her zaman mümkün olmayabilir. Bunun yerine belirli bir gemi modeli için türetilen spesifik formülasyonların genel ifadelerle kıyasla daha hassas ve doğru sonuçlar vereceği söylenebilir.

Wagner Smitt	Norrbın	Clarke	Inoue
$Y'_v / -\pi \left(\frac{T}{L} \right)^2 = 1.59$	$Y'_v / -\pi \left(\frac{T}{L} \right)^2 = 1.69 + 0.08 \frac{C_B B}{\pi T}$	$Y'_v / -\pi \left(\frac{T}{L} \right)^2 = 1 + 0.4 C_B \frac{B}{T}$	$Y'_v / -\pi \left(\frac{T}{L} \right)^2 = 1 + \frac{1.4}{\pi} C_B \frac{B}{T}$
$Y'_r / -\pi \left(\frac{T}{L} \right)^2 = -0.32$	$Y'_r / -\pi \left(\frac{T}{L} \right)^2 = -0.645 + 0.38 \frac{C_B B}{\pi T}$	$Y'_r / -\pi \left(\frac{T}{L} \right)^2 = -\frac{1}{2} + 2.2 \frac{B}{L} - 0.08 \frac{B}{T}$	$Y'_r / -\pi \left(\frac{T}{L} \right)^2 = -\frac{1}{2}$
$N'_v / -\pi \left(\frac{T}{L} \right)^2 = 0.62$	$N'_v / -\pi \left(\frac{T}{L} \right)^2 = 0.64 - 0.04 \frac{C_B B}{\pi T}$	$N'_v / -\pi \left(\frac{T}{L} \right)^2 = \frac{1}{2} + 2.4 \frac{T}{L}$	$N'_v / -\pi \left(\frac{T}{L} \right)^2 = \frac{2}{\pi}$
$N'_r / -\pi \left(\frac{T}{L} \right)^2 = 0.21$	$N'_r / -\pi \left(\frac{T}{L} \right)^2 = 0.47 - 0.18 \frac{C_B B}{\pi T}$	$N'_r / -\pi \left(\frac{T}{L} \right)^2 = \frac{1}{4} + 0.039 \frac{B}{T} - 0.56 \frac{B}{L}$	$N'_r / -\pi \left(\frac{T}{L} \right)^2 = \frac{1.04}{\pi} - \frac{4 T}{\pi L}$

Şekil 5. Lineer manevra türevi hesabı için gemi ana boyutları ve form katsayısına bağlı olarak verilen ampirik ifadeler (TMMOB Gemi Mühendisliği El Kitabı, 2011).

Yasukawa ve Yoshimura (2014) manevra problemine yalpa etkisini de dahil ederek üç farklı gemi formunun (yük gemisi, araba gemisi ve yolcu gemisi) doğrusal rota stabilitesinin tahmini için [33] no.'lu denklemde görüldüğü gibi bir ampirik formül önermişlerdir:

$$C'_\phi = C' - l' (Y'_v N'_\phi - Y'_\phi N'_v) \frac{Fr^2}{GM'} \quad [33]$$

Burada, C' geminin normal doğrusal rota stabilitesi kriterini, $Y'_v, N'_\phi, Y'_\phi, N'_v$ ifadeleri yanal hız ve yalpa açısına bağlı lineer manevra türevlerini, l' ise yanal kuvvetin tekneye etkidiği alanın düşey

uzunluğunu göstermektedir. $C'_\phi > C'$ olma durumunda geminin doğrusal rota stabilitesine sahip olacağını belirtmişlerdir. Başka bir çalışmada ise Zelazny (2014), küçük dümen açılarında ($\delta < 3^\circ$) dümene etkiyen kuvvetleri ve momenti hesaplayabilmek için 129 farklı geminin bilgilerini (dümen alanı, gemi boyu, su çekimi) kullanarak [34] no.'lu denklemdeki ampirik yaklaşımı geliştirmiş ve bu yaklaşımın ön dizayn aşamasında tanker, kuru yük ve konteyner gemilerinde küçük dümen açıları için kullanılabileceğini belirtmiştir.

$$X_R = |(0.0194 \cdot L \cdot T + 2.1874) \cdot c \cdot (a + b \cdot V)^2 \sin^2 \delta_R|$$

$$Y_R = \frac{1}{2} (1.14 - 0.6 \cdot C_B) \cdot (0.0194 \cdot L \cdot T + 2.1874) \cdot c \cdot (a + b \cdot V)^2 \sin 2\delta_R \quad [34]$$

$$M_R = -\frac{1}{4} L (1.14 - 0.6 \cdot C_B) \cdot (0.0194 \cdot L \cdot T + 2.1874) \cdot c \cdot (a + b \cdot V)^2 \sin 2\delta_R$$

Burada L gemi boyu, T su çekimi, V gemi servis hızı, C_B gemi blok katsayısı ve δ_R dümen açısıdır. a, b ve c katsayıları ise kuru yük ve konteyner gemileri için Tablo 2'deki gibi verilmiştir;

Tablo 2. Farklı formdaki gemiler için a, b ve c katsayıları (Zelazny, 2014).

	a[m/s]	b[-]	c[kg/m ³]
Kuru yük gemisi	4.252	0.262	1.350
Konteyner gemisi	5.333	0.329	1.394

[33] ve [34] no.'lu denklemlerde örnek olarak gösterilen ampirik yaklaşımların diğer yöntemlere göre bazı avantaj ve dezavantajları şu şekilde sıralanabilir:

Avantajları;

- Kullanımı hızlı ve maliyeti düşüktür.
- Farklı gemi formları için (küçük açılarda) kolayca tekrarlanabilme özelliğine sahiptir.
- Kullanılan matematik modelin türüne göre ampirik yöntemler zigzag ve dönme testi simülasyonları için kullanılabilir.

Dezavantajları;

- Sonuçların doğruluğu regresyon sınırlarıyla sabittir.
- Bu yöntemde genellikle manevra kabiliyeti için önemli olan tekne formunun detayları dikkate alınmaz.
- Aksi belirtilmediği takdirde ampirik yöntemler sakin suda ve sonsuz derinlikte verilirler. Dolayısıyla dalgalı denizlerde veya sığ sularda ampirik yöntemlerin yetersiz kalması muhtemeldir.

4.2. Viskoz hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleri

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), iç ve dış akışlarda cisim ile akışkan arasında etkileşim olan tüm fiziksel problemlerin, kütle-momentum-enerji korunumu denklemleri kullanılarak sayısal olarak modellenmesidir. Bu yöntemle hız, basınç, sıcaklık dağılımları, direnç ve kaldırma kuvvetleri, girdaplılık, türbülans parametreleri, akım hatları, vb. birçok akış özelliklerinin detaylı bir şekilde incelenmesi mümkündür. HAD yönteminde çözüm yapılmadan önce geometri için uygun bir kontrol

hacmi belirlenerek bu hacim daha küçük alt kontrol hacimlerine bölünür. Daha sonra çözülecek olan hareket denklemleri oluşturulan ağ örgüsüne uygun bir biçimde ayrıklaştırılır. Kısmi diferansiyel denklemlerin ayrıklaştırılması ile cebirsel denklem sistemleri (matris formu) elde edilmiş olur. Son olarak elde edilen denklemler tüm hesaplama bölgesi için sayısal olarak çözümlenir (Ünal, 2016).

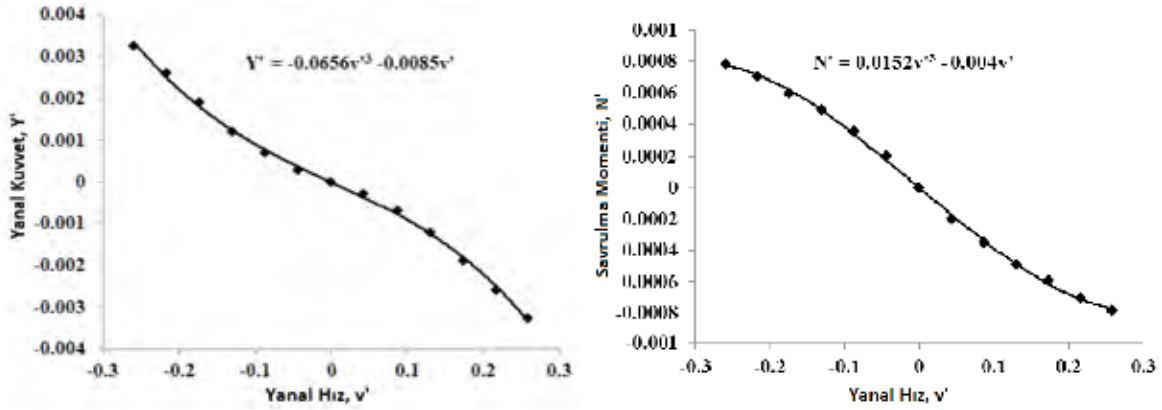
Son yıllarda viskoz HAD yöntemleri ile modellenen manevra simülasyonlarının pahalı ve uzun zaman alabilen deneylerin yerine geçerli bir alternatif olarak kullanılması fikri birçok araştırmacı tarafından benimsenmiştir. Örneğin tekne-pervane-dümen etkileşimi gibi kompleks fiziksel olayların olduğu akışlarda tekne etrafındaki akışın manevra performansını nasıl etkilediği HAD yöntemi ile hem sayısal hem de görsel olarak incelenebilmektedir. Bu yöntem ile geminin manevra performansı düzlemsel hareket mekanizması testi (PMM tests) simülasyonları modellenerek ya da doğrudan (free running tests) standart manevra testlerinin (dönme, zigzag, durma) simülasyonları gerçekleştirilerek belirlenebilir. Ancak doğrudan gerçekleştirilen serbest hareketli test (SHT) simülasyonlarından sonuç almak için gerekli olan sürenin düzlemsel hareket mekanizması (DHM) testi simülasyonlarına kıyasla yaklaşık 50 kat daha fazla olduğu belirtilmiştir (Oldfield vd., 2015). HAD yöntemi için bir diğer önemli konu ise çekme tankları veya model havuzlarında yapılan manevra deneyleri ile karşılaştırıldığında, doğruluk-maliyet oranı açısından avantajlı olmasıdır. Ancak HAD yöntemi her ne kadar uygulama kolaylığı ve maliyeti açısından elverişli olsa da ele alınan çift fazlı gemi problemlerinin karmaşıklığından ötürü uygulanan basitleştirme ve sadeleştirmeler nedeniyle güvenilirliği tam anlamıyla sağlanamamıştır. Şekil 5'te görüldüğü gibi 2008 yılında düzenlenen SIMMAN çalıştayında birçok araştırmacı tarafından farklı test gemi modelleri kullanılarak çift fazlı akışta (serbest su yüzeyi etkileri dahil edilerek) farklı viskoz HAD çözücülerıyla elde edilen kuvvet, moment ve manevra türevleri sonuçlarındaki ortalama bağıl hatalar karşılaştırılmıştır (Stern vd., 2011). HAD yöntemi ile yapılacak olan çalışmalarda elde edilen sonuçlardaki bağıl hatalar Şekil 6'da verilen hata mertebeleri göz önüne alınarak değerlendirilebilir. SIMMAN 2008 çalıştayında elde edilen sonuçlar için verilen hata mertebeleri incelendiğinde takıntılı form için bulunan bağıl hata büyüklüklerinin takıntısız forma göre daha fazla olduğu görülmektedir. Hatalardaki artışın nedeni olarak takıntıların etrafındaki kompleks akış alanının ve oluşan girdapların yeterli sayıda ve sıklıkta ağ elemanı ile temsil edilememesi veya uygun sayısal yaklaşımların (DES veya LES gibi) kullanılmamış olmasından dolayı gerçekleştiği söylenebilir. Ayrıca dinamik testlerden elde edilen kuvvet ve moment sonuçlarındaki bağıl hatalar statik sürüklenme testindeki hatalara göre daha fazla bulunmuştur. Dinamik testlerde dönme hareketinin de probleme dahil olmasıyla birlikte kuvvetler ve momentteki lineer olmayan etkilerin artış göstermesinin hatalardaki artışa neden olduğu söylenebilir. Genellikle ileri öteleme kuvveti (X) için bulunan bağıl hatalar yanıl öteleme kuvveti ve savrulma momentine nazaran daha fazla çıkmıştır. Salt yanıl ötelenme ve salt savrulma testinde elde edilen lineer manevra türevlerinde ortalama bağıl hata sırasıyla %8 ve %23 civarındayken lineer olmayan manevra türevlerinde bu oran %49 ve %32 seviyelerine çıkmıştır.

Test Türü	Referans Model	E _X %D	E _Y %D	E _N %D	Lineer Manevra Türevleri		Lineer olmayan Manevra Türevleri %D	
					Y%D	N%D		
Statik Dümen	KVLCC1, $\delta = 10^\circ$	3.5	59.7	-21.3	10-20	60		
	KVLCC2, $\delta = 10^\circ$	50.8	50.1	-36.5	14	58		
	Ortalama	27	55	-29	15	59		
Statik Sürüklenme	KVLCC1, $\beta = 0^\circ$	14.6	-	-	10-20	60		
	KVLCC1, $\beta = 12^\circ$	-14.4	-7.3	-11.9				
	KVLCC2, $\beta = 0^\circ$	-19.3	-	-	14	58		
	KVLCC2, $\beta = 12^\circ$	23.1	2.6	11.6				
	5415, $\beta = 10^\circ$	-14.3	4.1	8.9				
	5415 <i>takintili</i> , $\beta = 10^\circ$	-23.1	-14.4	11.9				
	Ortalama	18	7	10	15	59		
Salt Yanal Ötelenme	KVLCC1	22	10	10	7.7			65
	KVLCC2	18.6	11.3	11.3	5.8			75
	KCS				9.3	4.3		
	5415 <i>takintsiz</i>	23.6	9.7	9.7	6.9			30
	5415 <i>takintili</i>	21	30.5	30.5	15			25
	Ortalama	21.3	15.4	15.4	8		49	
Salt Savrulma	KVLCC1	38.3	20	20	19		50	
	KVLCC2	35.3	22.3	22.3	18		24	
	KCS				103.9	36.0		
	5415 <i>takintsiz</i>	20.5	21	21	16		-	
	5415 <i>takintili</i>	37	40	40	38		22	
	Ortalama	33	26	26	23		32	

Şekil 6. SIMMAN2008 çalıştayında HAD yöntemiyle elde edilen sonuçlardaki ortalama bağıl hatalar (Stern vd., 2011).

Günümüzde araştırmacılar manevra problemlerini çözebilmek için genellikle ANSYS Fluent, Star-CCM+, Numeca-FineMarine, vb. ticari viskoz akış çözücülerini kullanmaktadır [Ansys Inc, ANSYS Fluent; CD-Adapco, Star-CCM+; Numeca, FINE/Marine]. Bunun yanı sıra son zamanlarda manevra simülasyonları OpenFOAM gibi derlenmiş açık-kaynak kod kütüphaneleri kullanılarak da yapılmaya başlanmıştır (Hajivand ve Mousavizadegan, 2015; Shen ve Korpus, 2015). Viskoz akış çözücülerinde problemin fiziği modellenirken DNS (Direct Numerical Simulation), DES (Detached Eddy Simulation), LES (Large Eddy Simulation) ve RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) gibi farklı yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlardan DNS, DES ve LES yöntemlerinde belirli bir türbülans modeli kullanılmadığı için ağ örgüsü elemanlarının boyutları çok küçük mertebelere düşer ve ağ elemanı sayısı çok fazla arttığı için yüksek bilgisayar gücü gerektirirler.

Viskoz HAD yöntemi ile statik ve dinamik DHM testleri gerçekleştirilerek önce gemiye etkiyen kuvvetler ile momentin hesaplanması gerekir. Statik sürüklenme testinden elde edilen manevra katsayılarını hesaplayabilmek için öncelikle farklı sürüklenme açıları (β) tekne üzerinde oluşan kuvvetler ve momentler hesaplanır ve buna bağlı olarak bir kuvvet, moment (X,Y,N)-sürüklenme açısı (β) eğrisi oluşturulur. Hıza bağlı manevra türevlerini elde edebilmek için lineer bir yaklaşım ($U \sin \beta$) ile β açısından yanal hıza (v) geçiş yapılır. Daha sonra X-v, Y-v ve N-v grafikleri oluşturularak işaretlenen noktalara Şekil 7'de görüldüğü gibi üçüncü dereceden eğriler uydurulur (curve fitting) ve böylece eğri denkleminde yer alan katsayılar bulunarak manevra türevleri elde edilmiş olur.



Şekil 7. Manevra türevlerinin elde edilebilmesi için oluşturulan örnek Y-v ve N-v grafikleri (Shenoi, R., 2013).

Dinamik testlerde de benzer prosedür takip edilerek yanal-açısal hız ve ivmelere karşılık gelen bağlı eksen takımındaki kuvvetler ve moment okunarak grafik üzerinde işaretlenir. Ancak geminin frekans ve genliğe bağlı olarak harmonik hareket yaptığı dinamik testlerde manevra türevlerini hesaplayabilmek için yanal-açısal hız ve ivme değerleri Tablo 3'te gösterildiği gibi hesaplanmalıdır.

Tablo 3. Dinamik testlerde yanal genlik, rota açısı, yanal-açısal hız ve ivme değerlerinin bulunması

Salt Yanal Ötelenme Testi	Salt Savrulma Testi	Savrulma ve Sürüklenme Testi
$y = -y_{maks} \sin \omega t$	$\psi = -\psi_{maks} \cos \omega t$ $\psi_{maks} = \frac{y_{maks} \omega}{U}$	$\psi = -\psi_{maks} \cos \omega t + \beta$ $\psi_{maks} = \frac{y_{maks} \omega}{U}$
$v = -v_{maks} \cos \omega t$ $v_{maks} = y_{maks} \omega$	$r = r_{maks} \sin \omega t$ $r_{maks} = \psi_{maks} \omega$	$v = U \sin \beta$
$\dot{v} = \dot{v}_{maks} \sin \omega t$ $\dot{v}_{maks} = y_{maks} \omega^2$	$\dot{r} = \dot{r}_{maks} \cos \omega t$ $\dot{r}_{maks} = \psi_{maks} \omega^2$	-

Burada y geminin anlık harmonik hareket genliğini, v ve r anlık yanal ve açısal hızları, \dot{v} ve \dot{r} anlık yanal ve açısal ivmelenmeyi, ψ ise geminin anlık rota açısını göstermektedir.

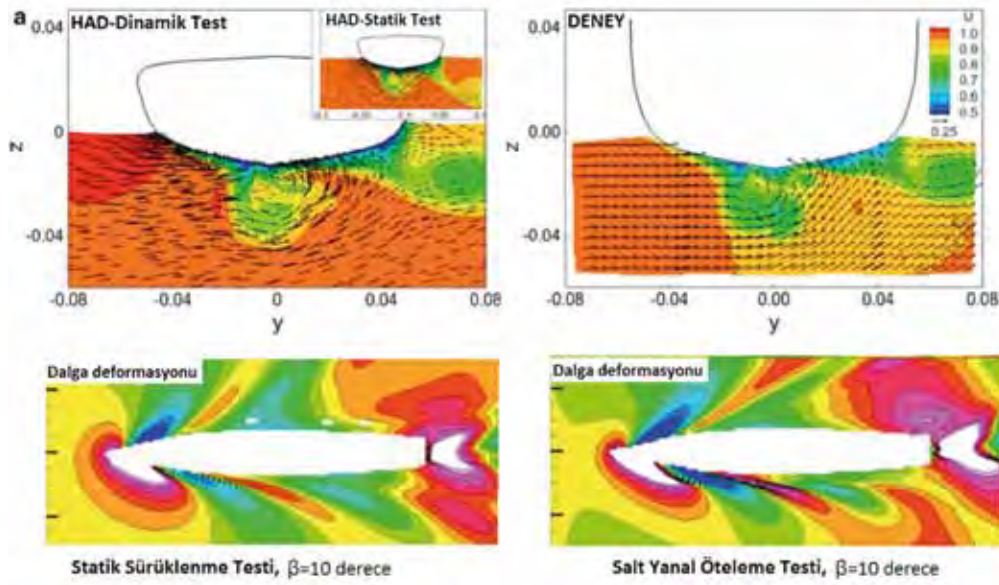
Yanal hıza hıza bağlı türevleri (Y_v , N_v) dinamik testler ile de bulmak mümkündür ancak modelin harmonik hareket yaptığı dinamik testler frekansa bağlı olduğu için statik sürüklenme testi ile elde edilen hıza bağlı türevlerin daha doğru olabileceği belirtilmiştir (Hajivand ve Mousavizadegan, 2015). Başka bir çalışmada gemi modelinin sinusoidal bir rotayı takip ettiği dinamik testlerde frekansa bağlı olarak belirlenen yanal hareket genliğinin de manevra türevlerine etkisinden bahsedilmiştir (Coe ve Neu, 2012). Lineer olmayan manevra türevleri için uyduzulan eğrilerin yine aynı noktalardaki daha yüksek dereceden türevlerine bakılmalıdır. Birleşik manevra türevlerini (coupled derivatives) elde edebilmek için ise diğer testlerden farklı olarak statik sürüklenme-dümen, dinamik savrulma-sürüklenme, dinamik savrulma-dümen gibi testlerin yapılması gerekmektedir. Tablo 4'te lineer manevra türevleri ve bu türevleri elde edebilmek için hangi testlerin yapılması gerektiği gösterilmiştir.

Tablo 4. HAD yöntemi ile lineer manevra türevlerini hesaplamak için yapılması gereken testler.

Lineer Manevra Türevleri	Statik sürüklenme testi	Statik dümen testi	Salt yanal ötelenme testi	Salt savrulma testi
Y_v	+	-	+	-
N_v	+	-	+	-
$Y_{\dot{v}}$	-	-	+	-

$N_{\dot{v}}$	-	-	+	-
$Y_{\dot{r}}$	-	-	-	+
$N_{\dot{r}}$	-	-	-	+
$Y_{\dot{\delta}}$	-	-	-	+
$N_{\dot{\delta}}$	-	+	-	-
Y_{δ}	-	+	-	-
N_{δ}	-	+	-	-

HAD yöntemi ile manevra türevlerini elde etmenin yanı sıra Şekil 8’de görülebileceği gibi bir geminin manevrası esnasında etrafında oluşan dalga deformasyonlarını ve ani dönüşlerde teknenin herhangi bir bölgesindeki hız ve girdap dağılımlarını da detaylı bir şekilde görselleştirmek mümkündür.

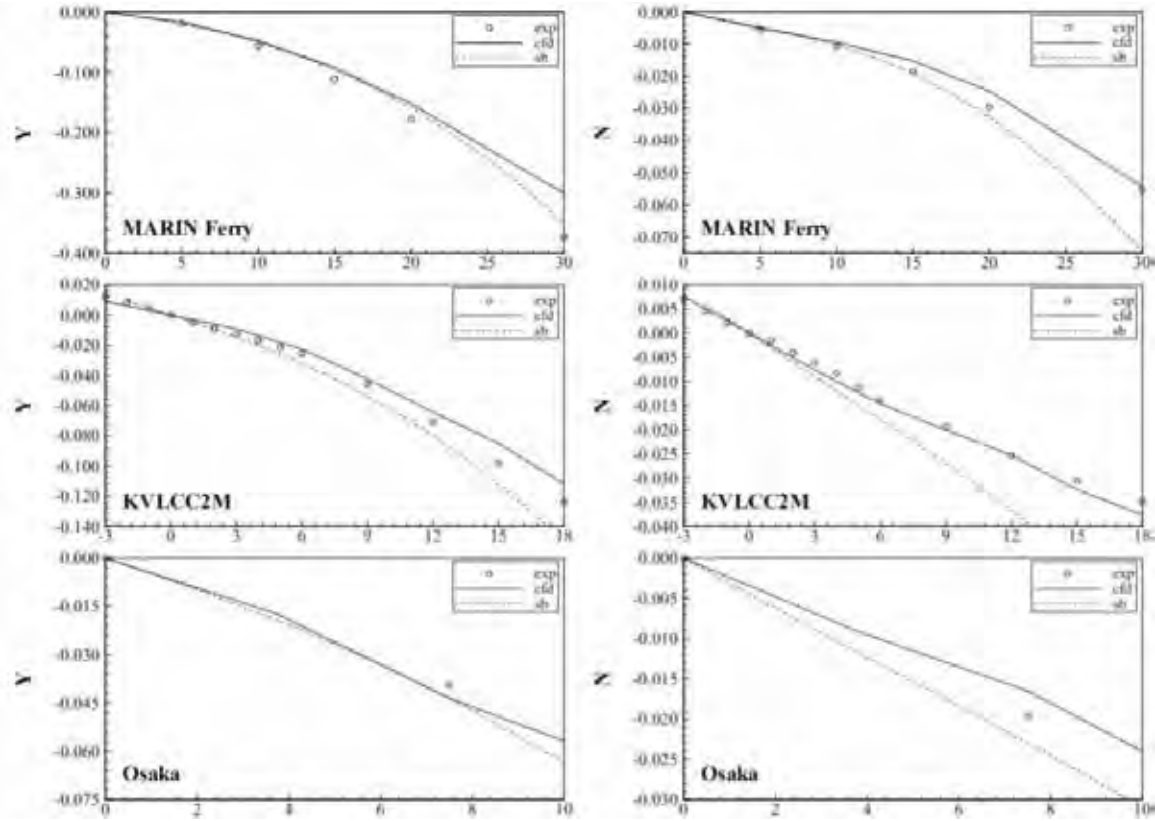


Şekil 8. Eksenal hız dağılımları ve dalga deformasyonlarının HAD yöntemi kullanılarak görselleştirilmesi (Sakamoto vd., 2012).

4.3. Viskoz Olmayan Yöntemler

Manevra yapan bir gemiye etki eden hidrodinamik kuvvetleri ve momentleri hesaplayabilmek için viskoz HAD çözücülerinin yanı sıra viskoz olmayan çözücülerden de faydalanılabilir. Viskoz olmayan yöntemler narin gövde yöntemi (slender body method) ve sınır elemanları/panel yöntemlerini (boundary element method) içerir. Bu yöntemleri kullanarak araştırmacılar tarafından gemilerin manevra performansları tahmin edilmeye çalışılmıştır. Toxopeus (2006), narin gövde yöntemi ile beş farklı referans gemi modeline (KVLCC2, Seri-60, MARIN Ferry, Osaka, HTC) etkiyen kuvvet ve momentleri hesaplamış ve lineer manevra türevlerini elde etmiştir. Şekil 9’da görüleceği gibi farklı sürüklenme açıları için potansiyel yöntemle bulunmuş olan yanal kuvvet ve savrulma momenti sonuçları viskoz HAD ve deney sonuçlarıyla karşılaştırmış ve sonuçların genel olarak uyumlu olduğu belirtilmiştir. Sadece savrulma momenti (N) bulunurken potansiyel teori geminin baş bölgesinde ek-kütle dağılımını normalden fazla hesapladığı için moment sonuçlarının da deneye göre biraz fazla çıktığı belirtilmiştir. Benzer bir çalışmada Wigley test modelinin manevra katsayıları yüksek mertebeli Rankine panel yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır (Wang ve Zou, 2006). Bu çalışmada DHM testlerinin küçük genliklerde sayısal olarak çözümlenebilmesi için problem frekans tabanında ele alındığı belirtilmiştir. Elde edilen manevra katsayıları ile Wigley modelinin dinamik stabilitesi

değerlendirilmiştir. Dinamik stabilitenin incelendiği bir başka çalışmada ise 4SD'ye sahip tek gövdeli bir deplasman gemisinin analizi için hidrodinamik özellikleri gemi ile benzer olan düz bir plaka seçilerek bu plaka üzerinde lineer Rankine panel yöntemi kullanılmış ve farklı hızlarda ve frekanslarda ek kütle ve sönüm katsayıları hesaplanmıştır (Ommani ve Faltinsen, 2013). Lineer dinamik stabilite analizinin yapıldığı bu çalışmada, hidrodinamik özellikleri gemi ile benzer olan bir düz plaka kullanılmış olmasına rağmen sonuçların deneysel verilerle uyumlu olduğu belirtilmiştir.



Şekil 9. Potansiyel teori ile elde edilen yanıl kuvvet ve savrulma momenti sonuçlarının viskoz HAD ve deney sonuçlarıyla karşılaştırılması (Toxopeus, 2006).

Potansiyel teori ile serbest su yüzeyi etkilerinin probleme dahil edildiği gemi manevra problemlerinin yanı sıra tamamen suya batmış cisimlere etkileyen hidrodinamik kuvvet ve momentler de hesaplanabilir. Hong (2007)'nin çalışmasında, üç boyutlu panel yöntemi ile derin suda tamamen batmış bir cisim için kaynak tekilliklerinin dağılımı kullanılarak cisme etkileyen düşey kuvvet ve baş-kıç vurma momenti hesaplanmıştır. Sonuçların deneysel verilerle uyumlu olduğu belirtilmiştir. Buradan dalga deformasyonlarının az olduğu düşük hızdaki durumlarda gemi modelleri için de sınır elemanları (panel) yöntemlerinin (SEY) kullanılabilceği çıkarımı yapılabilir.

SEY ile serbest su yüzeyi üzerinde veya altında ilerleyen iki veya üç boyutlu cisimlere etkileyen dalga direncinin hesaplandığı bazı çalışmalar literatürde mevcuttur (Bal, 2008a; Bal, 2008b; Uslu ve Bal, 2008). Yapılan bu çalışmalarda dalga sebebiyle oluşan kuvvetlerin SEY ile doğru bir şekilde hesaplanabildiği görülmüştür. Aynı yöntemi ile dalgalı sularda manevra yapan bir gemi üzerine etkileyen hidrodinamik kuvvet ve momentlerin hesaplandığı çalışmaların son yıllardaki artışı göze çarpmaktadır (ITTC-Maneuvering Committee, 2017). Örneğin, Subramanian ve Beck (2015) bir geminin dalgalı sudaki manevrasını inceleyebilmek için dilim teorisine (strip theory) dayanan zaman tabanlı (time-domain) bir yöntem geliştirmişlerdir. Lineerleştirilmiş serbest su yüzeyi sınır koşulları ile birlikte Laplace denklemini çözebilmek için sınır integral tekniğini kullanmışlardır. Bu çalışmada lineer

olmayan etkiler de probleme dahil edilerek S-175 test modelinin farklı dalga boyları ve geliş açıları için düzenli dalgalarda dönme manevrası gerçekleştirilmiş ve sayısal sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçların makul ölçüde deneysel verilerle uyduğu belirtilmiştir. Aynı gemiyi kullanan ve düzenli dalgalarda manevra problemini inceleyen bir başka çalışmada ise dalgaları baş taraftan alan ve sabit hızla ilerleyen geminin, iki boyutlu dilim teorisi kullanan bir program ile manevra türevleri hesaplanarak dönme ve zigzag manevraları farklı dalga boyları ve dalga yükseklikleri için hesaplanmıştır (Veedu ve Krishnankutty, 2016). Yapılan bu çalışmada sonuç olarak Tablo 5'ten de görülebileceği gibi geminin dönme veya zigzag manevrası yaparken genellikle dalganın ilerleme yönünde sürüklendiği ve dalga yüksekliği arttıkça gemi sürüklenme miktarının, yanal hareketin (transfer) ve taktik çapın arttığı belirtilmiştir. Ayrıca $\lambda/L=3$ 'e kadar dönme yarıçapının arttığı, bu değerden daha büyük dalga boylarında ise dönme yarıçapının azaldığı sonucuna varılmıştır.

Tablo 5. Farklı dalga boyu ve yüksekliklerinde elde edilen dönme manevrası parametreleri (Veedu ve Krishnankutty, 2016).

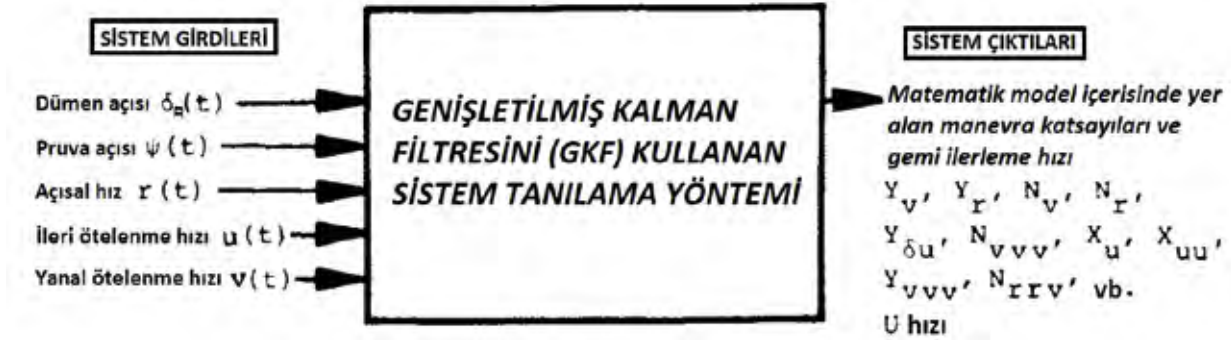
Dönme Manevrası	Sakin Su(m)	Dalga Yüksekliği, H(m)					Dalga Boyu/Gemi Boyu (λ/L)						
		1	1.5	2	2.5	3	0.5	1	1.5	3	4	5	6
Dönme Yarıçapı	155	145	150	156	164	104	149	145	170	235	220	191	180
Transfer	132	87	90	94	99	93	84	87	99	93	90	89	85
İlerleme	444	331	332	335	338	331	331	331	333	336	333	333	336
Taktik Çap	363	320	331	345	363	343	312	320	337	345	332	330	332

4.4. Sistem tanılama yöntemleri

Sistem tanılama yöntemleri (System Identification Methods) dinamik bir sistemin, deneysel veriler kullanılarak, istatistiksel yöntemler ile matematiksel modelinin çıkartılması olarak tanımlanabilir. Bu yöntemde hareketli bir sistemin matematik modeli (hareket denklemleri) gerçek sistemden alınan giriş-çıkış ölçümleriyle bulunmaktadır. Sistem tanılama yönteminin (STY) asıl amacı, belirli bir sistemdeki veri giriş-çıkışı ilişkisinden, daha sonra sistem üzerinde tekrar yapılacak çalışmalarda kullanılacak güvenilir bir matematiksel model kurmaktır. Gemi manevra problemlerinde ise manevra testlerinden elde edilen zamana bağlı sonuçlar (anlık konum, pruva açısı vs.) kullanılarak matematiksel bir model oluşturulur. Oluşturulan matematiksel model sonrasında giriş dataları değiştirilerek yeni çıkışlar incelenebilir. Bu tip sistem tanılama işlemleri yapılırken "Matlab Simulink Identification Toolbox" kullanılabilir. Yöntemin doğru bir şekilde uygulanabilmesi için testlerin yeterince geniş hız aralığı, sürüklenme açısı, dümen açısı ve açısal hızlarda yapılması gerektiği tavsiye edilmiştir (ITTC-Maneuvering Committee, 2008).

STY'lerde seyir tecrübesi sonuçları kullanılarak tam ölçekli bir geminin manevra performans parametreleri de elde edilebilir. Örneğin Abkowitz (1964), Genişletilmiş Kalman Filtresini (Extended Kalman Filter) kullanarak ESSO OSAKA test gemisinin seyir tecrübesi sonuçlarına STY yaklaşımını başarılı bir şekilde uygulamıştır. Bu çalışmada Abkowitz'in manevra katsayılarını elde edebilmek için kullandığı STY prosedürü Şekil 10'da şematik olarak gösterilmiştir. Ancak bu yöntem serbest hareketli model testlerinde kullanılırken kullanılan parametrelerin aralığı dikkate alınmalıdır, aksi takdirde, manevra katsayıları matematiksel olarak hesaplanırsa da sonuçlar fiziksel olarak hiçbir anlam ifade etmeyecektir. Örneğin, 10/10 zigzag testi için kullanılan yöntem, 20/20 zigzag manevrası için doğru sonuçlar vermeyecektir. Araki vd. (2012) tarafından farklı STY'ler (Genişletilmiş Kalman Filtresi ve En Küçük Karalar Yöntemi) ile SHT sonuçları (deney ve HAD) kullanılarak manevra katsayıları elde

edilmiştir. Bu çalışmada En Küçük Kareler (EKK) yönteminin tekne ve dümene ait manevra türevlerini doğru bir şekilde hesapladığı ancak Genişletilmiş Kalman Filtresi (GKF) ile dümen türevleri hesaplanırken bazı hatalar olduğu belirtilmiştir. İki farklı STY'nin de dönme manevrası sonuçlarının (ilerleme, transfer, dönme yarıçapı) deneysel verilere göre bağlı hataları karşılaştırılmış ve EKK yöntemini kullanınca sonuçlardaki ortalama bağlı hatanın daha düşük çıktığı belirtilmiştir. Benzer bir çalışmada Yin vd. (2015), Abkowitz modeli içerisinde yer alan manevra türevlerini geliştirdikleri "Kısmi EKK" yöntemini kullanarak hesaplamışlardır. Geliştirdikleri yeni yöntemi doğrulamak için 20/20 zigzag HAD simülasyonunun sonuçlarını kullanmışlar ve STY ile elde ettikleri manevra katsayılarını DHM testinden elde edilmiş olan manevra katsayıları ile karşılaştırmışlardır. Bu yöntemin normal EKK yöntemine göre daha doğru sonuçlar verdiği ve ön dizayn aşamasında pratik olarak kullanılabilirliğini belirtmişlerdir. Sonuç olarak uzun ve pahalı olan model deneylerine alternatif olabilecek STY ile HAD yöntemi kullanılarak doğrudan modellenmiş manevra simülasyonlarının sonuçları sistem girdisi olarak kullanılıp araştırma maliyetleri azaltılabilmektedir.



Şekil 10. Abkowitz'in ESSO OSAKA test gemisinin seyir tecrübesi sonuçlarını kullanarak manevra katsayılarını elde ettiği STY prosedürünün şematik olarak gösterimi (SNAME, 1989).

4.5. Deneysel yöntemler

Deney havuzlarında manevra ile ilgili model deneyleri iki ayrı şekilde gerçekleştirilmektedir:

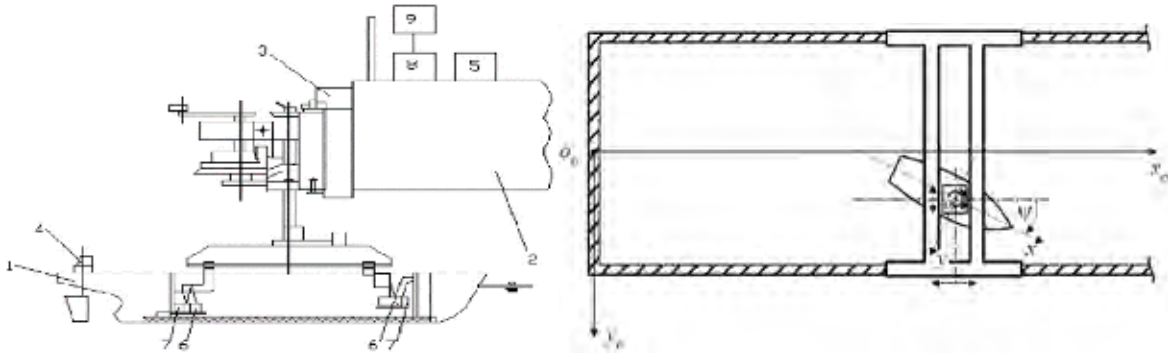
- Kontrol edilebilir sevk ve manevra donanımına sahip ölçekli modellerle yapılan deneyler (Serbest Hareketli Test),
- Kontrol edilebilir sevk ve manevra donanımına sahip olmayan sabitlenmiş ölçekli modellerle yapılan deneyler (Düzlemsel Hareket Mekanizması ve Döner-Kol Testleri).

4.5.1. Serbest hareketli testler

Serbest hareketli testler (Free Running Tests) manevra performansının belirlenmesinde gerçeğe en yakın yöntem olarak değerlendirilmektedir (ITTC-Maneuvering Committee, 2008). Bu yöntemde gerekli görülen standart manevra testleri doğrudan yapılır ve elde edilen sonuçlarla model ölçeği kullanılarak tam ölçekli gemi değerlerine geçiş yapılabilir. Deneylerin yapılabilmesi için direnç-sevk deneylerinin yapıldığı çekme havuzları yetersiz kalabilir. Bu yüzden serbest hareketli testler (SHT) için genellikle kare şeklinde geniş havuzlar kullanılır. Özellikle model ölçeğinin büyük olduğu durumlarda dış etkilere kapalı doğal ve baraj gölleri de kullanılabilir. Bu yöntemde sevk ve manevra donanımı modellenmesinde ölçek etkisi kaçınılmazdır ve mutlaka dikkate alınmalıdır (TMMOB Gemi Mühendisliği El Kitabı, 2011). SHT'lerin yapılabilmesi için bir modelin uzaktan kumanda ile kontrol

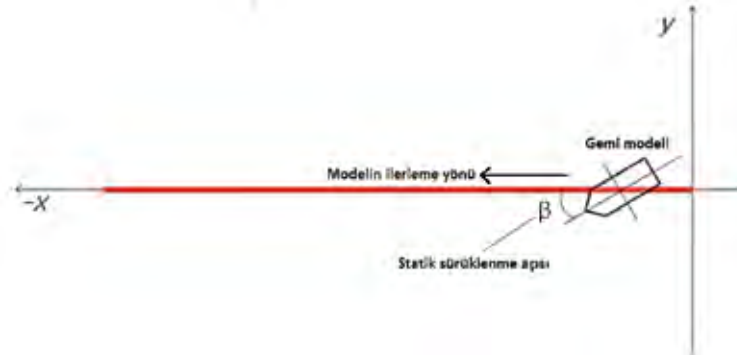
4.5.2. Düzlemsel hareket mekanizması ve döner-kol testleri

Düzlemsel Hareket Mekanizması (Planar Motion Mechanism) testlerinin yapılmasındaki asıl amaç bir gemiye ait manevra türevlerini belirlemektir. Manevra türevleri statik sürüklenme testi, statik dümen testi, salt yanal öteleme, salt savrulma veya savrulma-sürüklenme gibi testler gerçekleştirilerek elde edilmektedir. Örnek bir düzlemsel hareket mekanizması (DHM) Şekil 13'te gösterilmiştir. Bu yöntemde gemi modeli, sürüklenme açısı, savrulma hızı, yan ötelenme ivmesi, savrulma ivmesi ve dümen açısı gibi değişkenlere göre test edilir. Elde edilen hidrodinamik kuvvet ve moment sonuçları hareket denklemlerinin çözümünde kullanılacak hidrodinamik katsayıların bulunmasında kullanılır (Sabuncu, 1985).



Şekil 13. DHM sisteminin genel görünüşü. 1. Gemi modeli, 2. Çekme arabası, 3. Düzlemsel hareket mekanizması, 4. Dümen dişlisi, 5. Dümen kontrol sistemi, 6. Yanal kuvvet ölçen dinamometreler, 7. Boyuna kuvvet ölçen dinamometreler, 8. Sinyal yükseltici, 9. Veri toplama ve işleme sistemleri (Obreja vd., 2010; ABS, 2006).

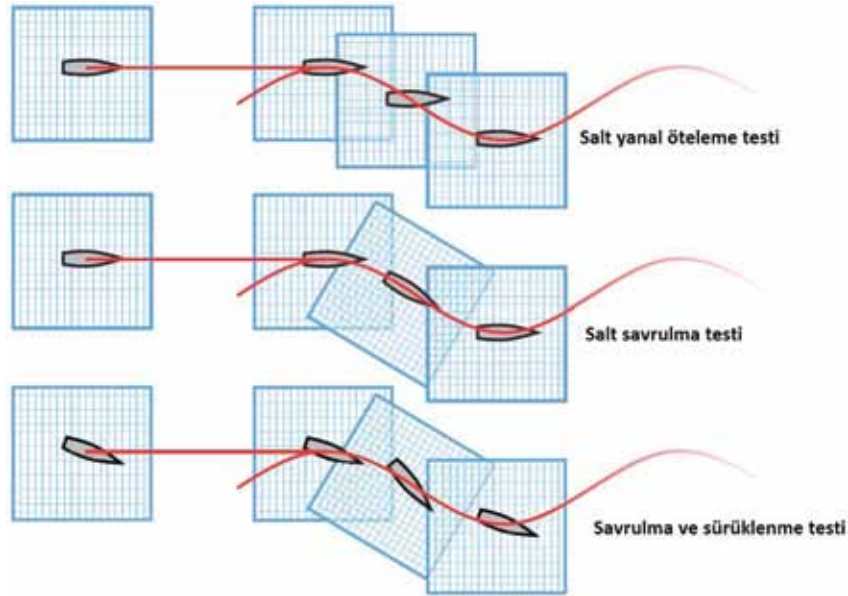
Yukarıda bahsedildiği üzere DHM testleri statik ve dinamik testler olmak üzere iki ayrı kısımda ele alınır. Statik sürüklenme testi bir çekme tankı içerisinde modeli belirli bir sürüklenme açısıyla sabit bir hızda çekerek gerçekleştirilir. Statik dümen testinde ise model sabit bir hızda ve sürüklenme açısında sadece dümen açısı değiştirilerek çekilir. Deneyler yapılırken modelde herhangi bir ivmelenme ya da dönme hareketi olmadığı için bu testlerde modele ait sadece yanal hız türevleri (Y_v, N_v, Y_{vv}, N_{vv}) ve dümene ait türevler ($Y_\delta, N_\delta, Y_{\delta\delta}, N_{\delta\delta}$) elde edilebilir. Statik sürüklenme testinin şematik olarak görünümü Şekil 14'te gösterilmiştir.



Şekil 14. Statik sürüklenme testi (Sukas ve Kinaci, 2016).

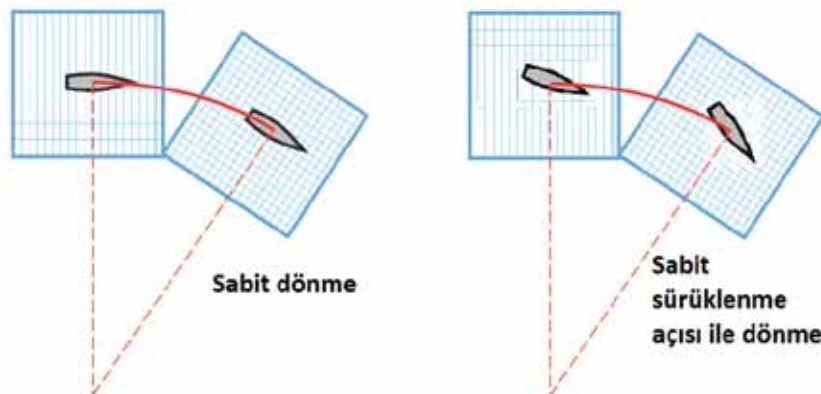
Dinamik testler ise gemi modelinin belirlenmiş yanal genlik mesafesi (A) ve harmonik hareket frekansına (ω) bağlı olarak sinüsoidal bir rotayı takip ettiği testlerdir. Bu testlerde de statik testlerde olduğu gibi tekne üzerine etkiyen ileri ve yanal ötelenme kuvvetleri ile savrulma momenti ölçülür. Dinamik DHM testleri Şekil 15'te görüldüğü gibi salt yanal öteleme, salt savrulma ve savrulma ve

sürüklenme testlerinden oluşmaktadır. Bu testlerden lineer ve lineer olmayan hız, ivme ve çapraz-birleşik manevra türevleri elde edilebilir. DHM testlerinde lineer manevra türevleri hesaplanırken pruva açısının 10° 'yi geçmemesi önerilmiştir (He vd., 2016). DHM deneylerine bir alternatif olarak Hallmann ve Quadvlieg (2015) yeni bir yöntem önermiştir. Bu yöntemde klasik DHM testlerinin aksine model ilerlerken sadece bir adet dinamik hareket gerçekleştirilmemekte, bunun yerine model yavaş ama devamlı olarak hareketini değiştirmektedir. Örneğin, model bir ya da iki periyot boyunca harmonik yanal ötelenme hareketini yapmakta daha sonra savrulma hareketine geçiş yapmaktadır. Böylece geminin hidrodinamik katsayıları belirlenirken daha az sayıda test yapıp zamandan tasarruf edilebileceği belirtilmiştir.



Şekil 15. Dinamik DHM testleri (Oldfield vd., 2015).

DHM testleri haricinde diğer bir model deney yöntemi ise Döner-Kol Tekniği'dir (Rotating Arm Technique). Şekil 16'da görüleceği üzere gemi modeli havuzun ortasında bulunan döner kolun ucuna bağlanarak sabit olarak veya belirli bir sürüklenme açısıyla döndürülür. Bu teknik ile dönmeye ait manevra türevleri elde edilebilir ve bu yöntem ile elde edilen dönmeye ait manevra katsayılarının DHM testlerinden alınan sonuçlara kıyasla daha doğru olabileceği söylenmiştir (Pan vd., 2015). Bu duruma DHM testlerinde çekme tanklarının kısıtlı yanal genişliğe sahip olmasından dolayı genellikle küçük model ölçeklerinde çalışılması ve blokaj etkisinin neden olduğu söylenebilir.



Şekil 16. Döner-kol testinin sabit ve belirli bir sürüklenme açısı ile yapılması (Oldfield, 2015).

Döner-kol testi (DKT) ile yapılacak deneylerde model dönme hızına kadar ivmelendirilerek ölçümlerin tek bir turda tamamlanması gerekir. Aksi takdirde model kendi hareketinden dolayı bozulmuş olan su akımıyla tekrar karşılaşacağından modelin suya göre gerçek hızında değişim olacaktır. DKT ile Y_r ve N_r türevlerinin hesaplanabilmesi için bu katsayıların $r = 0$ civarında elde edilmesi gerektiğinden küçük açısal hız değerlerine karşılık gelen kuvvet ve momentin ölçülmesi gereklidir. Bu da R/L (dönme yarıçapı/model boyu) oranının büyük olmasını gerektirir. Bundan dolayı, deneylerde kullanılan modellerin boyutları büyüdükçe kol yarıçapının (R) da aynı oranda büyüme gereksinimi sonucu, bu yöntemin bir dezavantajı olarak çok büyük çaplı dairesel havuz ve döner kola sahip laboratuvarların kullanılması zorunlu hale gelir ve bu durum da maliyetin artmasına neden olur (Uşar, 2007).

5. Sonuçlar

Gemilerin manevra performanslarının tahmini ile ilgili değerlendirmelerin yapıldığı iki bölümlük çalışmanın ilk kısmında literatürde yer alan bazı önemli çalışmalar referans gösterilerek genel bir değerlendirme yapılmıştır. Elde edilen çıkarımlarla gemi tipi, matematiksel model ve manevra performansı belirleme yöntemleri gibi konular ele alınarak bazı teorik bilgiler verilmiştir. Ayrıca hangi konuların çalışılmakta olduğu ve hangi çalışma alanlarında eksiklikler olduğu belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen çıkarımlar kısaca şu şekilde özetlenebilir:

- Manevra performansının sayısal tahminlerinde genellikle Abkowitz veya MMG modellerinin kullanıldığı görülmüştür. Abkowitz modeli, tekne üzerine etkiyen hidrodinamik kuvvetler ve momenti üçüncü dereceden Taylor serisine açarak gemiyi takıntılarla beraber bir bütün olarak ele alan bir yaklaşım geliştirmiştir. MMG modeli ise hidrodinamik kuvvetler ve momenti, tekne, pervane ve dümen üzerinde ayrı olarak ele alan ve Abkowitz modelinden farklı olarak bunların birbirleriyle etkileşimlerini de hesaba katan modüler bir yaklaşımdır. Hızlı tekneler için ise kullanılan matematik modele dördüncü bir yalpa denkleminin eklenmesi gerekmektedir. Ayrıca derin su şartı için türetilmiş olan matematik modeller sığ su koşullarında geçerli olmamaktadır.
- Y_v , N_v , N_r lineer manevra türevlerinin matematik model kullanılarak elde edilen bazı manevra performans parametreleri (taktik çap, ilerleme, transfer, aşırı sapma açısı, doğrusal rota stabilitesi) üzerinde güçlü etkisi bulunmaktadır. N_δ , N_{vvr} , $N_{vv\delta}$ türevlerinin aşırı sapma açısı üzerinde herhangi bir etkisi yoktur. Lineer olmayan Y_{vvr} , $Y_{vv\delta}$, $N_{\delta\delta v}$ manevra katsayıları özellikle dönme manevrasını (taktik çap) önemli ölçüde etkilemektedir. Yanal ivmeye bağlı olan lineer $N_{\dot{v}}$ türevinin sadece zigzag testinden elde edilen aşırı sapma açısı üzerinde etkisi vardır. Lineer olmayan X_{vv} , Y_{vvv} , $Y_{\delta\delta\delta}$, $Y_{\delta\delta v}$, N_{vvv} , $N_{\delta\delta\delta}$ türevlerinin ise bahsedilen manevra performans parametreleri üzerinde hiçbir etkisi bulunmamaktadır.
- Ampirik yöntemler, manevra katsayılarını tekne ana boyutları cinsinden ifade eden formüllerin elde edilebilmesine olanak sağlar ancak yine de elde edilen sonuçlar genellikle tatmin edici olmamaktadır. Çünkü kapsamı geniş olan bu tip yöntemlerde istenilen doğruluk derecesinde sonuçlar elde edilebilmesi için çok fazla sayıda verinin kullanılması gereklidir. Bunun yerine belirli bir gemi modeli için türetilen ampirik ifadelerin genel formülasyonlara kıyasla daha hassas ve doğru sonuçlar vereceği söylenebilir.

- Deneysel yöntemler bir geminin manevra performansı ve hidrodinamik katsayılarının belirlenmesinde hala en güvenilir yöntem olarak geçerliliğini korumaktadır. Uzun süre gerektiren DHM testlerine alternatif olarak önerilen bir yöntemde modeli bir ya da iki periyot boyunca harmonik yanal ötelenme hareketini yaptırıp ve daha sonra hareketi durdurmadan savrulma hareketine geçiş yaptırarak geminin hidrodinamik katsayıları belirlenirken daha az sayıda test yapıp zamandan tasarruf edilebileceği son yıllarda yeni bir yöntem olarak önerilmiştir. Ancak bu yöntemin sağlıklı bir şekilde uygulanabilmesi için çekme tankının yeterli uzunlukta olması gerekmektedir.
- Deneylelerin masraflı oluşu ve uzun süre almasından dolayı son yıllarda yapılan çalışmalarda viskoz HAD yöntemleriyle elde edilen sonuçlar deneysel verilerle doğrulanarak yöntemin geçerliliği büyük ölçüde ispatlanmıştır. HAD yöntemleriyle sadece sonuç elde etmenin yanısıra manevra yapan bir geminin etrafındaki akışa ait birçok karakteristik özellik de ayrıntılı olarak görselleştirilebilmektedir. Ancak HAD yönteminin performansı bilgisayarların işlemci ve önbellek performansı ile doğrudan ilişkili olduğundan simülasyonlar güçlü bilgisayarlar ile yapılmazsa sonuç alma süresi uzamakta ve yöntem verimliliğini kaybetmektedir. Bundan dolayı son yıllarda sayısal ve deneysel sonuçlar STY'ler ile birlikte kullanılarak araştırma maliyetleri düşürülmektedir. Manevra problemlerinde dalga deformasyonlarının az olduğu düşük hızdaki durumlarda ise sınır elemanları (panel) yöntemleri (SEY) alternatif bir yöntem olarak tercih edilebilir.
- Literatürde tek gövdeli test modeller (KCS, KVLCC, DTC, HTC, DTMB, S-175) ile ilgili çok sayıda sayısal ve deneysel sonuç bulunurken, katamaran tipi tekneler için sadece DELFT372 modeli ile yapılmış birkaç çalışma bulunmaktadır. DTC test modeli ile genellikle sığ su etkisi incelenmiş, S-175 modeli kullanılarak da dalgalı durumda manevra analizleri yapılmıştır. Katamaranların manevra performanslarının belirlenmesiyle ilgili literatürde hala yeterli sayıda sayısal ve deneysel veri bulunmadığı gözlenmiştir. Bu yüzden farklı katamaran geometrileri kullanılarak daha fazla sayıda çalışma yapılabilir.
- Denizaltılar ile ilgili yapılacak olan manevra çalışmalarında araştırmacılara DARPA Suboff test modelinin takıntısız (AFF-1) ve tam takıntılı (AFF-8) test konfigürasyonlarının kullanılması tavsiye edilmiştir. Yapılmış olan çalışmalarda ise genellikle manevra türevleri farklı sayısal yaklaşımlarla (DES, LES, RANS, URANS) ve farklı ağ örgüsü yapıları (rijit, dinamik) kullanarak hesaplanmıştır. Özellikle statik sürüklenme testindeki yüksek sürüklenme açılarında dinamik ağ örgüsünün rijit ağ örgüsüne kıyasla daha doğru sonuçlar verdiği söylenmiştir. Dinamik (overset) ağ yapısı kullanılınca ağ elemanlarında çok fazla deformasyon olmadığı için ortogonalite (diklik) değerlerinin çok fazla düşmediği ve buna bağlı olarak da sonuçlardaki belirsizlik oranlarının rijit ağ örgüsüne kıyasla daha düşük çıktığı belirtilmiştir.

Kaynakça

Abkowitz, M. A. (1964). Lectures on Ship Hydrodynamics-Steering and Maneuverability. Hydro-Og Aero-Dynamisk Laboratorium, Report No. Hy-5, Lyngby, Denmark.

Abkowitz, M. A. (1969). Stability and Motion Control of Ocean Vehicles, Cambridge, The MIT Press.

Aksu, E. ve Köse, E. (2017). Evaluation of Mathematical Models for Tankers' Maneuvering Motions. *Journal of ETA Maritime Science*, 5 (1), pp. 95-109.

American Bureau of Shipping (ABS), (2006). Guide for Vessel Manoeuvrability.

Ansys Inc., ANSYS-FLUENT. The United States of America.

Araki, M., Hosseini, H.S., Sanada, Y., Tanimoto, K., Umeda, N., Stern, F. (2012). Estimating maneuvering coefficients using system identification methods with experimental, system-based, and CFD free- running trial data. *Ocean Engineering*, 51, pp. 63–84.

Bal, S. (2008a). Prediction of Wave Pattern and Wave Resistance of Surface Piercing Bodies by a Boundary Element Method. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 56, Issue 3, pp: 305-329.

Bal, S. (2008b). Performance Prediction of Surface Piercing Bodies in Numerical Towing Tank. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol. 18, No: 2, 106-111.

Brogli, R., Zaghi, S., Campana, E.F., Visonneau, M., Queutey, P., Dogan, T., Sadat-Hosseini, H., Stern, F., ve Milanov, F. (2013). CFD Validation for DELFT 372 Catamaran in Static Drift Conditions, Including Onset and Progression Analysis. NATO AVT-189 Specialists Meeting on Assessment of Stability and Control Prediction Methods for NATO Air & Sea Vehicles, Portsmouth, U.K.

Brogli, R., Zaghi, S., Di Mascio, A. (2011). Numerical simulation of interference effects for a high-speed catamaran. *Journal of Marine Science and Technology*. Vol.16(3), pp. 254–269.

Brogli, R., Jacob, B., Zaghi, S., Stern, F., Olivieri, A. (2014). Experimental investigation of interference effects for high-speed catamarans. *Ocean Engineering*. Vol. 76, pp. 75-85.

Carrica, P.M., Ismail, F., Hyman, M., Bushan, S., Stern, F. (2013). Turn and zigzag maneuvers of a surface combatant using a URANS approach with dynamic overset grids. *Journal of Marine Science and Technology*, Vol.18, pp. 166-181.

Carrica, P.M., Mofidi, A., Eloit, K., Delefortrie, K. (2016). Direct simulation and experimental study of zigzag maneuver of KCS in shallow water. *Ocean Engineering*, 112, pp. 117-133.

Carrica, P.M., Stern, F. (2008). DES simulations of KVLCC1 in turn and zigzag maneuvers with moving propeller and rudder. Proceedings of SIMMAN 2008 workshop on verification and validation of ship maneuvering simulation methods, Lyngby, Denmark.

CD Adapco, Star-CCM+, England.

Clarke, D., Gedling, P. ve Hine, G. (1982). The Application of Maneuvering Criteria in Hull Design Using Linear Theory. Meeting of The Royal Institution of Naval Architects, London, England.

Coe, R.G. (2013). Improved Underwater Vehicle Control and Maneuvering Analysis with Computational Fluid Dynamics Simulations, PhD Thesis. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.

Coe, R.G. ve Neu, W.L. (2012). Amplitude effects on virtual PMM tests. *Oceans 2012*, DOI: 10.1109/OCEANS.2012.6405027.

Cura Hochbaum, A. (2011). On the numerical prediction of the ship's manoeuvring behaviour. *Ship Science and Technology*, Vol.5, No:9, pp. 27-39.

Dogan, T.K. (2013). URANS and DES for Delft Catamaran for Static Drift Conditions in Deep Water. MS Thesis, University of Iowa.

- Duman, S., Bal, S. (2016). Numerical Investigation of Scale Effects on Maneuvering Coefficients of DTMB 5415 Hull. 1st International Congress on Ship and Marine Technology, Piri Reis University, Tuzla, Istanbul, Turkey.
- Eloot, K. (2006). Selection, Experimental Determination and Evaluation of a Mathematical Model for Ship Manoeuvring in Shallow Water. PhD Thesis, Universiteit Gent.
- Falchi, M., Felli, M., Grizzi, S., Aloisio, G., Broglia, R., Stern, F. (2014). SPIV measurements around the DELFT 372 catamaran in steady drift. *Experimental Fluids*, Vol. 55:1844. DOI 10.1007/s00348-014-1844-z.
- Faltinsen, Hydrodynamics of High Speed Vehicle. (2005). Camb. Univ. Pres.
- Fossen, T.I. (2011). Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
- Hajivand, A. ve Mousavizedegan, S.H. (2015a). Virtual maneuvering test in CFD media in presence of free surface. *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, Vol. 7, pp. 540-558.
- Hajivand, A. ve Mousavizedegan, S.H. (2015b). Virtual simulation of maneuvering captive tests for a surface vessel. *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, Vol. 7, pp. 848-872.
- Hallmann, R. and Quadvlieg, F. (2015). Instationary Captive Model Tests. MARSIM 2015, Newcastle, UK, 14 pp.
- He, R., Zhang, Z. Z., Wang, X. Z. ve Feng, D. K. (2016). Numerical Simulation of the Ship Bottom Interaction of DTC Con-tainer Carrier for Different Keel Clearance in Pure Sway Motion. MASHCON 2016, Hamburg, Germany, pp. 65–72.
- He, S., Kellett, P., Yuan, Z., Incecik, A., Turan, O., Boulougouris, E. (2016). Manoeuvring prediction based on CFD generated derivatives. *Journal of Hydrodynamics*, 28(2), pp. 284-292.
- He, W., Castiglione, T., Kandasamy, M. ve Stern, F. (2014). Numerical Analysis of the Interference Effects on Resistance, Sinkage and Trim of a Fast Catamaran. *Journal of Marine Science and Technology*. DOI 10.1007/s00773-014-0283-0.
- Hong, Y. (2007). Computation of Forces and Moments of Undersea Vehicles with Non-Body-Of-Revolution Hull. 9th Numerical Ship Hydrodynamics Conference, Vol. I.
- Inoue, S., Hirano, M., ve Kijima, K. (1981). Hydrodynamic derivatives on Ship Manoeuvring, *International Shipbuilding Progress*, Vol. 28, No. 321, May.
- ITTC Manoeuvring Committee. (2002). Final report and recommendations to the 23th ITTC, Recommended Procedures – Full Scale Maneuvering Trials Procedure. Proceedings of the 23th International Towing Tank Conference.
- ITTC Manoeuvring Committee. (2008). Final report and recommendations to the 25th ITTC. Proceedings of the 25th International Towing Tank Conference, Fukuoka, Japan.
- ITTC Manoeuvring Committee. (2011). Final report and recommendations to the 26th ITTC. Proceedings of the 26th International Towing Tank Conference, Rio de Janeiro, Brazil.
- ITTC Manoeuvring Committee. (2014). Final report and recommendations to the 27th ITTC. Proceedings of the 27th International Towing Tank Conference, Copenhagen, Denmark.
- ITTC Manoeuvring Committee. (2017). Final report and recommendations to the 28th ITTC. Proceedings of the 28th International Towing Tank Conference, Wuxi, China.

- Kim, H., Akimoto, H. ve Islam, H. (2015). Estimation of the hydrodynamic derivatives by RaNS simulation of planar motion mechanism test. *Ocean Engineering*, 108, pp. 129–139.
- Larsson, L., Stern, F., Bertram, V. (2003). Benchmarking of Computational Fluid Dynamics for Ship Flows: The Gothenburg 2000 Workshop.
- Larsson, L., Stern, F., Visonneau, M. (2013). CFD in Ship Hydrodynamics-Results of the Gothenburg 2010 Workshop. IV International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, pp 237-259.
- Lewandowski, E. M. (2002). *The Dynamics of Marine Craft – Maneuvering and Seakeeping*. Advanced Series on Ocean Engineering, Volume 22. World Scientific Publishing, Singapore.
- Luo, W., Moreira, L., Soares, C.G. (2014). Manoeuvring simulation of catamaran by using implicit models based on support vector machines. *Ocean Engineering*, Vol. 82, pp. 150-159.
- Matusiak, J. (2017). *Dynamics of a Rigid Ship*. Aalto University publication series, Finland.
- Milanov, E. ve Stern, F. (2012). System Based Simulation of DELFT372 Catamaran Manoeuvring Characteristics as Function of Wate Depth and Approach Speed. 29th Symposium on Naval Hydrodynamics, Gothenburg, Sweden.
- Milanov, E., Zlatev, Z., Chotukova, V. ve Stern, F. (2010). Numerical and Experimental Prediction of the Inherent Course Stability of High Speed Catamaran in Deep and Shallow Water. 28th Symposium on Naval Hydrodynamics, Pasadena (Ca).
- Milanov, E., Zlatev, Z., Chotukova, V. ve Stern, F. (2011). Analysis of inherent course stability of a high-speed catamaran in deep and shallow water. *International Shipbuilding Progress*, 58, pp. 83–96.
- Miller, R.W. (2008). PMM calculations for the bare and appended DTMB 5415 using the RANS solver CFDHIP-IOWA. Proceedings of SIMMAN 2008 workshop on verification and validation of ship maneuvering simulation methods, Lyngby, Denmark.
- Mousaviraad V. (2012). Complimentary EFD and CFD on effects of headwinds on towing tank resistance and PMM tests for ONR tumblehome. Proceedings of 29th Symposium on Naval Hydrodynamics, Gothenburg, Denmark.
- Mucha, P. ve Moctar, O.E. (2015). Revisiting mathematical models for manoeuvring prediction based on modified Taylor-series expansions. *Ship Technology Research*, 62:2, pp. 81-96.
- Newman, J. N. (1977). *Marine Hydrodynamics*. Cambridge, The MIT Press.
- Norrbin, N.H. (1970). Theory ve observation on the use of a mathematical mode for ship maneuvering in deep and conned waters. In: Proceedings of the 8th Symposium on Naval Hydrodynamics. Pasadena, CA, pp. 807–904.
- Numeca, FINE/Marine, ISIS-CFD. Flow Integrated Environment for Marine Hydrodynamics, Belgium.
- Obreja, D., Nabergoj, R., Crudu, L., Pacuraru-Popoiu. (2010). Identification of hydrodynamic coefficients for manoeuvring simulation model of a fishing vessel. *Ocean Engineering*, 37, pp. 678-687.
- Ogawa, A., Kasai, H. (1978). On the mathematical model of maneuvering motion of ship. *ISP25(292)*, 306–319.
- Oldfield, C., Larmaei, M.M., Kendrick, A., McTaggart, K. (2015). Prediction of Warship Manoeuvring Coefficients using CFD. DRDC-RDDC-2015-P169, Canada.

- Ommani, B. ve Faltinsen, O. (2013). An Investigation on the Calm-Water Linear Dynamic Stability of Semi-Displacement Vessels in Sway-Roll-Yaw. FAST 2013, Amsterdam, The Netherlands.
- Pan, Y., Zhang, H. ve Zhou, Q. (2012). Numeical Prediction of Submarine Hydrodynamic Coefficients Using CFD Simulation. *Journal of Hydrodynamics*, 24(6), pp. 840-847. DOI: 10.1016/S1001-6058(11)60311-9.
- Pan, Y., Zhou, Q. ve Zhang, H. (2015). Numerical simulation of rotating arm test for prediction of submarine rotary derivatives. *Journal of Hydrodynamics*, 27(1), pp. 68-75. DOI: 10.1016/S1001-6058(15)60457-7.
- Pandey, J. ve Hasegawa, K. (2016). Study on Turning Manoeuvre of Catamaran Surface Vessel with a Combined Experimental and Simulation Method. *IFAC-PapersOnLine*, 49-23, pp. 446-451.
- Polis, C., Ranmuthugala, D., Duffy, J. ve Renilson, M. (2013). Enabling the Prediction of Manoeuvring Characteristics of a Submarine Operating Near the Free Surface. Pacific 2013, International Maritime Conference, Sydney, Australia.
- Sabuncu, T. (1985). Gemi Manevraları ve Kontrolü, İ.T.Ü Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi Ofset Baskı Atölyesi, İstanbul.
- Sakamoto, N., Ohashi, K. (2012). Viscous CFD Simulations of DTMB model 5512 under pure yaw manoeuvring motion. JASNAOE Fall Annual Meeting, Chiba, Japan.
- Sakamoto, N., Carrica, P.M., Stern, F. (2012). URANS simulations of static and dynamic maneuvering for surface combatant: part 1. Verification and validation for forces, moment, and hydrodynamic derivatives. *Journal of Marine Science and Technology*, DOI: 10.1007/s00773-012-0178-x.
- Sakamoto, N., Carrica, P.M., Stern, F. (2012). URANS simulations of static and dynamic maneuvering for surface combatant: part 2. Analysis and validation for local flow characteristics. *Journal of Marine Science and Technology*, DOI:10.1007/s00773-012-0184-z.
- Shen, Z. ve Korpus, R. (2015). Numerical Simulations of Ship Self-Propulsion and Maneuvering Using Dynamic Overset Grid in OpenFOAM.
- Shenoi, R. (2013). Prediction of maneuvering coefficients of a container ship by numerically simulating HPMM using RANSE based solver. 3rd International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water, Ghent, Belgium.
- Simonsen, C. D., Stern, F. (2008). RANS simulation of the flow around the KCS container ship in pure yaw. *Proceedings of the SIMMAN 2008 workshop*.
- Smitt, W.L. (1971). Steering and Manoeuvring Full Scale and Model Tests (Parts-2), *European Shipbuilding*, Vol. 20, No.1.
- Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME). (1950). Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body Through a Fluid, *Technical Research Bulletin*.
- Society of Naval Architecture and Marine Engineers (SNAME). (1989). *Principles of Naval Architecture*, Vol III.
- Stern, F., Agdrup, K. (2011). Experience from SIMMAN 2008 – The first workshop on verification and validation of ship maneuvering simulation methods. *Journal of Ship Research*, Vol. 55, No. 2, pp. 135-147.
- Stern, F., Wilson, R.V., Shao, J. (2006). Quantitative V&V of CFD simulations and certification of CFD codes. *International Journal of Numerical Methods for Fluids*, pp. 1335–1355.

- Subramanian, R. ve Beck, R. F. (2015). A Time Domain Strip Theory Approach to Predict Maneuvering in a Seaway. *Ocean Engineering*, Vol. 104, pp. 107–118.
- Sukas, O.F. ve Kinaci, O.K. (2016). A rigid grid approach for ship maneuvering simulations. 2nd International Meeting on Recent Advances in Prediction Techniques for Safe Manoeuvring of Ships and Submarines, 17 – 18 November 2016, Istanbul, Turkey.
- Sukas, O.F., Kinaci, O.K, Cakici, F., Gokce, M.K. (2017). Hydrodynamic assessment of planing hulls using overset grids. *Applied Ocean Research*, 65, pp. 35-46.
- Takanori, H. (2005). Proceedings of the CFD Workshop, Tokyo, National Maritime Research Institute Japan.
- TMMOB Gemi Mühendisliği El Kitabı. (2011). Gemi Mühendisleri Odası Yayınları, İstanbul.
- Toxopeus, S. (2006). Validation of slender-body method for prediction of linear manoeuvring coefficients using experiments and viscous-flow calculations. ICHD 2006, Ischia, Italy.
- Tyagi, A. ve Sen, D. (2006). Calculation of transverse hydrodynamic coefficients using computational fluid dynamic approach. *Ocean Engineering*, No. 33, Technical Note, pp. 798-809.
- Ueno, M., Yoshimura, Y., Tsukada, Y., Miyazaki, H. (2009). Circular motion tests and uncertainty analysis for ship manoeuvrability. *Journal of Marine Science and Technology*, 14, pp. 469-484.
- Uslu, Y. ve Bal, S. (2008). Numerical Prediction of Wave Drag of 2-D and 3-D Bodies Under or on a Free Surface. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, Vol. 32, pp:177-188.
- Uşar, D. (2007). Manevra Simülasyonları İle Yarı Ampirik Tahmin Yöntemlerinin Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Gemi İnşaatı Mühendisliği Programı, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Ünal, U.O. (2016). Gemi Etrafındaki Viskoz Akışın Hesaplamalı Analizi Ders Notları, İTÜ.
- Vaz, G., Toxopeus S. ve Holmes, S. (2010). Calculation of Manoeuvring Forces on Submarines Using Two Viscous-Flow Solvers. Proceedings of the ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2010, Shanghai, China.
- Veedu, R.T. ve Krishnankutty, P. (2016). Numerical study on the maneuvering of a ship in waves based on unified state space model. Proceedings of the ASME 2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2016, June 19-24, 2016, Busan, South Korea.
- Wang, H.M. ve Zou, Z.J. (2006). Prediction of Ship Dynamic Stability Using a NURBS based Higher Order Panel Method. MARSIM 2006, Terschelling Island, Netherlands.
- Wu Ban-shan, Xing Fu ve Kuang Xiao-feng (2005). Investigation of hydrodynamic characteristics of submarine moving close to the sea bottom with CFD methods. *Journal of Ship Mechanics*, 9 (3), pp. 19-28.
- Yasukawa, H. ve Yoshimura, Y. (2014). Roll-Coupling Effect on Ship Maneuverability. *Ship Technology Research*, Vol. 61, No.1, pp. 16–32.
- Yasukawa, H., Yoshimura, Y. (2015). Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions. *J. Mar. Sci. Technol.* 20 (1), pp. 37–52.
- Yin, J. C., Zou, Z. J. ve Xu, F. (2015). Parametric Identification of Abkowitz Model for Ship Maneuvering Motion by Using Partial Least Squares Regression. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vol. 137, 8 pp.

Yoon, H.Y, Simonsen, C.D., Benedetti, L., Longo, J., Toda Y., Stern F. (2015). Benchmark CFD validation data for surface combatant 5415 in PMM maneuvers – Part I: Force/moment/motion measurements. *Ocean Engineering*, 109, pp. 705-734.

Yoon, H.Y. (2009). Force/moment and phase-averaged stereo PIV flow measurements for surface combatant in pmm maneuvers. Ph.D. thesis, The University of Iowa, Iowa City, Iowa, USA.

Zaghi, S., Broglia, R., Di Mascio, A. (2011). Analysis of the interference effects for high-speed catamarans by model tests and numerical simulations. *Ocean Engineering* 38(17–18), pp. 2110–2122.

Zhang, X.G. ve Zou, Z.J. (2013). Estimation of the hydrodynamic coefficients from captive model test results by using support vector machines. *Ocean Engineering*, Vol.73, pp. 25-31.

Želazny, K. (2014). Approximate Method of Calculating Forces on Rudder During Ship Sailing on a Shipping Route. *International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. Vol. 8, No.3, pp. 459–464.

Zlatev, Z., Grigoropoulos, G., Milanov, E. ve Stern, F. (2011). CFD studies of the Delft 372 catamaran bare hull in deep and shallow water. NATO AVT-189 Specialists Meeting on Assessment of Stability and Control Prediction Methods for NATO Air & Sea Vehicles, Portsmouth, U.K.

Zlatev, Z., Milanov, E., Chotukova, V., Sakamoto, N. ve Stern F. (2009). Combined Model-Scale EFD-CFD investigation of the Maneuvering Characteristics of a High Speed Catamaran. 10th International Conference on Fast Sea Transportation, FAST 2009, Athens, Greece: October 5 - 8, 2009.