

Gemilerin Manevra Performans Tahminleri İçin Genel Bir Değerlendirme-II

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

Denizde güvenliği sağlamak ve kirlenmeye yol açabilecek kazaları asgari seviyede tutabilmek amacıyla IMO (International Maritime Organization) tarafından gemilerin manevra kabiliyetleri ile ilgili bazı kriterler belirlenmiştir. Gemilerin manevra performans tahminlerinin incelendiği çalışmanın bu bölümünde IMO'nun belirlemiş olduğu gemi manevra kabiliyeti kriterleri ve bu kriterleri sağlayabilmek için yapılması gereken standart manevra testleri gösterilmiştir. Hangi manevra testinin neden yapıldığı ve sonuçlarının nasıl yorumlanması gerektiği ile ilgili bazı bilgiler verilmiştir. Ayrıca bir geminin dönme kabiliyeti ve doğrusal rota stabilitesine sahip olup olmadığına nasıl karar verileceği teorik olarak anlatılmıştır. Son bölümde ise gemilerin manevra performans tahminlerini etkileyen iç ve dış faktörlerden bahsedilmiş ve bu konularla ilgili yapılmış olan bazı çalışmalardan sonuçlar gösterilmiş ve yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Gemi manevraları; manevra türevi; hidrodinamik katsayı; hesaplamalı akışkanlar dinamiği; matematik model; dönme testi; zigzag testi; manevra performansı; düzlemsel hareket mekanizması; sıg su etkisi; ölçek etkisi

A Review on Prediction of Ship Manoeuvring Performance, Part 2

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

The International Maritime Organization (IMO) has set some criteria for the maneuverability of ships, in order to ensure safety at sea and keep collisions that may lead to pollution to minimum level. In this part of the two-part paper, maneuverability standards for ships that IMO has specified and the standard maneuvering tests that have to be done to meet these criteria have been investigated. Some information has been provided about why the maneuvering tests are performed and how their results should be interpreted. It is also theoretically explained how to decide whether a ship has the turning ability and straight line stability. Lastly, the internal and external factors that influence the maneuvering performance estimation of ships were examined and some results given in the literature were interpreted briefly.

Keywords: Ship maneuvering, maneuvering derivatives, hydrodynamic coefficients, computational fluid dynamics, Abkowitz mathematical model, spiral test, zigzag test, maneuvering performance, planar motion mechanism, shallow water effect, scale effect

Terminoloji

HAD:	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği	X:	İleri Öteleme Kuvveti
DHM:	Düzlemsel Hareket Mekanizması	Y:	Yanal Öteleme Kuvveti
SHT:	Serbest Hareketli Test	N:	Savrulma Momenti
IMO:	International Maritime Organization	K:	Yalpa Momenti
SD:	Serbestlik Derecesi	L:	Gemi Boyu
DKT:	Döner Kol Testi	B:	Gemi Genişliği
RANS:	Reynolds Averaged Navier-Stokes	h:	Su Derinliği
DES:	Detached Eddy Simulation	T:	Su Çekimi

ITTC:	International Towing Tank Conference	β :	Sürüklenme Açısı
MMG:	Matematiksel Modelleme Grubu	δ :	Dümen Açısı
x_G :	Gemi Ağırlık Merkezinin Mastoriye Uzaklığı	ψ :	Pruva Açısı
LCB:	Gemi Su Altı Hacim Merkezinin Boyuna Yeri	φ :	Yalpa Açısı
Fr:	Froude Sayısı	u :	Bağlı eksen takımında ileri ötelenme hızı
U, V:	Gemi Servis Hızı	v :	Bağlı eksen takımında yanıl ötelenme hızı
σ :	Doğrusal Rota Stabilitesi İndeksi	r :	Bağlı eksen takımında açısal savrulma hızı
C:	Doğrusal Rota Stabilitesi Kriteri	\dot{u} :	Bağlı eksen takımında ileri ötelenme ivmelenmesi
K ve T:	Manevra Kabiliyeti İndeksleri	\dot{v} :	Bağlı eksen takımında yanıl ötelenme ivmelenmesi
r_0 :	Sabit Dönme Oranı	\dot{r} :	Bağlı eksen takımında açısal savrulma ivmelenmesi
D_0 :	Sabit Dönme Çapı	ω :	Harmonik hareket frekansı
C_L ve C_D :	Kaldırma ve Direnç Katsayıları	α :	Aşırı dönme açısı
m:	Deplasman kütlesi	λ :	Ölçek oranı; Dalga boyu
I_z :	Z eksenini etrafındaki atalet momenti	H:	Dalga yüksekliği

1. Giriş

Bütün gemileri kapsayan bir manevra standardının olmamasından ötürü bazı gemiler bilinçsiz bir şekilde kötü manevra yeteneğine sahip olacak şekilde tasarlanmakta ve bu durum kazalara ve dolayısıyla deniz kirlenmelerine yol açabilmektedir. Bundan dolayı güvenlik açısından gemilerin manevra yetenekleriyle ilgili kapsamı geniş ve ayrıntılı bir döküman hazırlanması gerekmektedir. Şu an itibarıyla IMO'nun sadece açık denizde yüzen gemilerle ilgili bir dökümanı bulunmaktadır (International Maritime Organization, 2002a,b). İç sularda çalışan gemiler için ise farklı uluslararası komisyonlar tarafından sadece Avrupa'da Rhine nehri ve Çin'de Yangtze nehri gibi belirli sığ su bölgeleri baz alınarak birtakım kriterler önerilmiştir (ITTC-Manoeuvring Committee, 2014), ancak hala IMO tarafından farklı gemi tiplerini ve çevre şartlarını (ör: dalgalı su, sığ su, vb.) içeren daha kapsamlı bir döküman hazırlanmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Gemi manevra kabiliyetleriyle ilgili kriterler Tablo 1'de görüleceği üzere dönme kabiliyeti, başlangıç dönme kabiliyeti, savrulma ve rota tutma kabiliyeti ve durma kabiliyeti olacak şekilde ortaya konulmuştur (International Maritime Organization, 2002a, b). Daidola vd. (2002) bu kriterlerin zamanla nasıl ortaya konduğundan ve geliştirildiğinden bahsetmiştir. Bu kriterler sadece derin suda seyreden, 100 m'den büyük ve klasik sevk sistemlerine (pervane ve dümen) sahip açık deniz gemileri için geçerli olup, geleneksel sevk sistemine sahip olmayan (azimut pervane gibi) daha küçük gemiler için bu standartlar geçerli değildir. Ancak IMO, belirlemiş olduğu standartların şu an için tüm gemilere uygulanabileceği yönünde tavsiyesini bildirmiştir.

Tablo 1. Gemiler için IMO Manevra Standartları (International Maritime Organization, 2002a,b).

Manevra Yetenekleri	Kriterler	Standart Testler	IMO Standartları
Dönme Kabiliyeti	Taktik Çap	Dönme Testi	Taktik Çap < 5L
	İlerleme		İlerleme $\leq 4.5L$
Savrulma ve Rota Değiştirme Kabiliyeti	Birinci Aşırı Sapma Açısı	10/10 Zig-Zag Test	$L/V < 10s$ ise $\alpha \leq 10^\circ$ $L/V \geq 30s$ ise $\alpha \leq 20^\circ$ $10s < L/V < 30s$ ise $5+0.5[L/V]^{[1]}$
	İkinci Aşırı Sapma Açısı		$L/V \geq 30s$ ise $\alpha \leq 25^\circ$ $L/V \geq 30s$ ise $\alpha \leq 40^\circ$ $10s < L/V < 30s$ ise $17.5+0.75[L/V]$
	Birinci Aşırı Sapma Açısı	20/20 Zig-Zag Test	$\alpha \leq 25^\circ$
Başlangıç Dönme Kabiliyeti	10° 'lik rota değişimine kadar alınan mesafe	10/10 Zig-Zag Test	Alınan mesafe $\leq 2.5L$
Durma Kabiliyeti	Alınan Toplam Mesafe	Durma Testi	Toplam yol < $15L^{[2]}$
	Yatay Mesafe		Yok

1) Burada $L[m]$ gemi boyu, $V[m/s]$ gemi hızı, $\alpha[derece]$ ise aşırı dönme açısıdır.

2) Boyutları büyük, sevk gücü düşük gemilerde Taktik Çap < 20L.

IMO'nun yalpa açısı ile ilgili belirlediği başka bir kriterde ise yolcu gemilerinin güvenliği için dönme manevrasında oluşacak azami yalpa açısının 10° 'yi geçmemesi gerektiği tavsiye edilmiştir. Ancak RINA (Registro Italiano Navale) bu kriterde küçük bir düzenlemeye giderek yolcu gemilerinin dönme

manevrası esnasında oluşacak azami yalpa açısının 15° , gemi sabit bir dönme hızına ulaştığında ise bu açının azami 10° olması gerektiğini belirtmiştir. SOLAS (Safety of Life at Sea) tarafından önerilen bir başka kriterde dümen motorunun kapasitesi ele alınmıştır. Buna göre bir gemi tam hız yol alırken dümen açısı 0° 'den $+30^\circ$ 'ye daha sonra -35° 'ye ve sonra tekrar ilk konumuna (0°) (ITTC-Manoeuvring Committee, 2014). Askeri gemiler için ise güncel manevra performans kriterleri ve bu kriterlerin DTMB5415M test modeli üzerinde uygulanışı Quadvlieg vd. (2010)'nin çalışmasında bulunabilir.

Gemilerin manevra performans tahminlerinin incelendiği ve iki ayrı makaleden oluşan çalışmanın bu bölümünde ilk çalışmadan farklı olarak IMO'nun belirlemiş olduğu gemi manevra kabiliyeti kriterleri baz alınarak yapılması gereken standart manevra testleri (dönme, zigzag, durma) gösterilmiştir. Hangi manevra testinin neden ve nasıl yapıldığı, elde edilen sonuçların nasıl yorumlanması gerektiği ile ilgili bazı bilgiler verilmiştir. Ayrıca bir geminin dönme kabiliyeti ve doğrusal rota stabilitesine sahip olup olmadığına indeksler (K ve T) yardımıyla nasıl karar verileceği teorik olarak anlatılmıştır. Son bölümde ise gemilerin manevra performans tahminlerini etkileyen iç ve dış faktörlerden bahsedilmiş ve bu konularla ilgili yapılmış olan bazı çalışmalar incelenmiş ve yorumlanmıştır.

2. Manevra performansının belirlenmesi

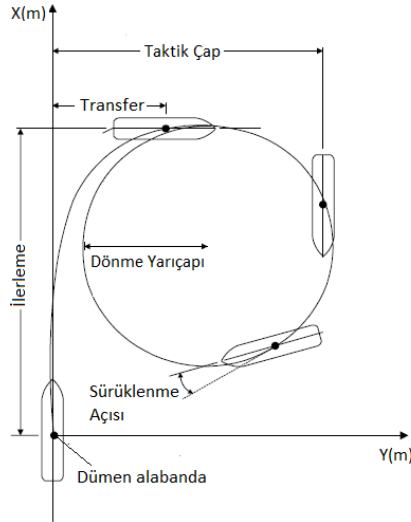
Pratikte, bir gemi veya denizaltının izlemiş olduğu rotadan sapmaması için dümen (denizaltılarda düşey ve yatay dümenler) kullanılır. Yani takip edilen rotanın istenildiği zaman değiştirilmesi veya rotadan sapmış olan geminin doğru bir şekilde asıl rotasına tekrar dönebilmesi için geminin rota değiştirme ve rota tutma kabiliyetlerinin önceden bilinmesi gerekir. Özellikle sığ ve kısıtlı sularda çalışan gemilerin seyri esnasında veya deniz trafiğinin yoğun olduğu iç sularda geminin izlemiş olduğu yörüngesini sık sık değiştirmesi gerekebilir. Böyle durumlarda dönme ve başlangıç dönme kabiliyetlerine sahip olan bir gemi dümeni kolay bir şekilde dinleyerek istenilen manevraları yapabilir. Gemi veya denizaltılarda bahsedilen manevra kabiliyetlerini belirleyebilmek için deneysel olarak bir dizi test yapılması gereklidir. Bu testler IMO'nun önermiş olduğu standart dönme, zigzag ve durma testleridir. Standart testler haricinde geminin manevra kabiliyetini daha hassas bir şekilde irdeleyebilmek amacıyla IMO'nun önerdiği diğer manevra testleri (çıkış, basit spiral, düz spiral, ters spiral) TMMOB Gemi Mühendisliği El Kitabı'nda (2011) mevcuttur. Deneysel yöntemler haricinde daha önce önerilmiş olan bazı teorik formülasyonlarla da gemilerin manevra ve rota tutma kabiliyetleri yaklaşık olarak belirlenebilir.

2.1. Dönme manevrası testi

Dönme manevrası testi gemi manevra deneyleri arasında en sık uygulanan testlerden birisidir. Dönme testi, dümen etkisinde olan geminin dönme performansını belirlemek amacıyla gerçekleştirilir. Test sırasında öncelikle gemi doğrusal bir yörünge üzerinde belirli bir hıza sabitlenir. Daha sonra dümen iskele ya da sancak yönünde 35° veya mümkün olan azami dümen açısına kadar döndürülerek geminin izlemiş olduğu dairesel yörünge kaydedilir. Dönme manevrası testi ve test sırasında ölçülen değerler Şekil 1'de gösterilmiştir.

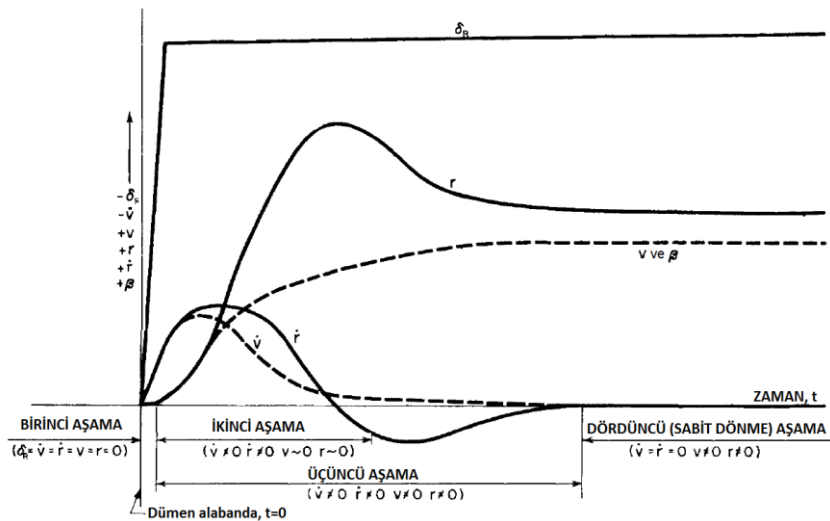
Geminin dönme yarıçapını belirleyebilmek için genellikle geminin en az iki tur (720°) dönmesine izin verilir. Bu test sonucunda ilerleme, transfer, dönme yarıçapı, taktik çap, sürekli dönmeye hız kaybı, 90° dönme süresi ve 180° dönme süresi gibi geminin dönme performansı için önemli olan parametreler belirlenmiş olur. Bu parametreler arasında yer alan hız kaybının iki ana sebebi bulunmaktadır.

Bunlardan ilki dümenin kırılmasıyla birlikte geminin izlediği hareket yörüngesine ters yönde etki gösteren dümen kuvveti bileşeninin oluşmasıdır. İkinci sebep ise dönme manevrası esnasında oluşan sürüklenme açısı ile hareket doğrultusundaki sürtünme direncinin artış göstermesidir [Sabuncu, 1985]. Bu test esnasında ölçülen dönme yarıçapı ne kadar küçükse geminin dönme kabiliyeti o ölçüde yüksek olmaktadır. Dönme yarıçapının yüksek çıkması ise geminin rota tutma kabiliyetinin yüksek olduğunu gösterir.



Şekil 1. Standart dönme manevrası testi.

Dönme manevrası dört farklı aşamadan oluşmaktadır. Her bir dönme aşamasındaki hız ve ivme değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi Şekil 2’de gösterilmiştir. İlk aşama geminin doğrusal rota üzerinde sabit bir hızla ilerlediği ($v = \dot{v} = r = \dot{r} = 0$) ve dümenin ilk alabanda edilme anına kadar geçen zamandır. İkinci aşama ise dümenin başlangıç konumundan (0°) döndürüleceği azami açığa gelene kadar geçen süreyi kapsayan ve geminin dümen kuvvet etkisinde yatay olarak dönme yönüne zıt yönde ilerlemeye başladığı bir zaman diliminden oluşmaktadır. Bu aşamada dümen yanal kuvvet bileşeni ($Y_\delta \delta$) ve momenti ($N_\delta \delta$) gemide yanal (\dot{v}) ve açısal ivmelerin (\dot{r}) oluşmasını sağlarlar. Ancak bu aşamada gemi henüz kendi eksenini etrafında dönemediği ve sürüklenme açısı çok küçük ($\beta \cong \frac{v}{U}$) olduğu için yanal (v) ve açısal hız (r) büyüklükleri ihmal edilebilecek düzeydedir ($v = r = 0, \dot{v} = \dot{r} \neq 0$).

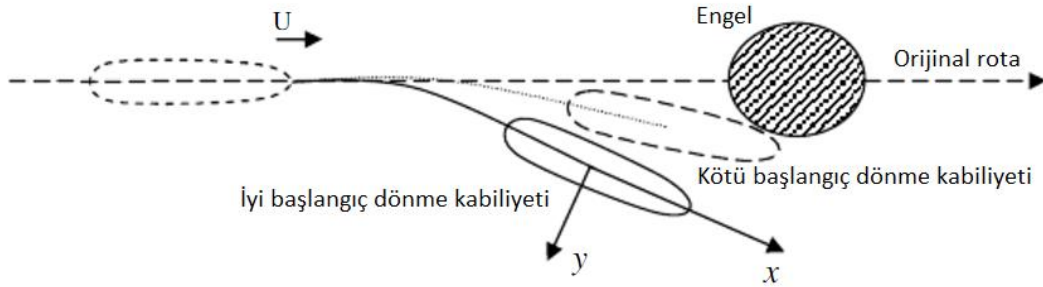


Şekil 2. Hız, ivme ve dümen açısı değerlerinin dönme manevrası esnasındaki değişimi (SNAME, 1989).

Bir sonraki aşama olan üçüncü aşama aslında ikinci aşamayı da kapsamaktadır. Bu aşamada azami açıya kadar kırılmış olan dümene geminin ilerleme yönünde ($X_\delta\delta$) ve yanal yönde ($Y_\delta\delta$) dümen kuvvetleri etkimeye başlar. Bu kuvvetler bağlı eksen takımında z eksenini etrafında bir moment oluşturarak gemiyi döndürür. $X_\delta\delta$ bileşeni geminin hareket doğrultusuna zıt yönde etkidiği için gemi direncini artırarak geminin ilerleme hızının azalmasına neden olur. Bu aşamada, U hızıyla doğrusal rota üzerinde ilerlemekte olan gemiye önce $Y_\delta\delta$ kuvveti etkidiği için gemi kütle merkezinin yörüngesi dönme yönüne zıt yönde yanal olarak az miktarda değişir. Daha sonra gemi yanal kuvvet ve dönme momentinin etkisiyle r hızıyla dümenin alabanda edildiği yön doğrultusunda dönmeye başlar. Üçüncü dönme aşamasının sonunda (geminin ilk konumuna göre yaklaşık 100° - 120° 'lik dönüşünü gerçekleştirdikten sonraki konumuna geldiği anda) gemiye etkileyen hidrodinamik yanal kuvvet bileşeni ($Y_v v$) ile merkezkaç kuvveti birbirlerini dengeleyeceği için yanal ivme (\dot{v}) azalarak neredeyse sıfıra eşit olur. Benzer şekilde r açısal hızıyla dönen gemide bu dönmeye karşı zıt yönde oluşan momentin etkisiyle açısal ivme (\dot{r}) bu aşama sonunda neredeyse sıfıra eşit olur ($v = r = \dot{v} = \dot{r} \neq 0$). Açısal ivmenin azalması ve sonunda sıfıra çok yakın bir değer alması sürüklenme açısının da (β) büyüyerek azami sabit değerine ulaşmasını sağlar. Dördüncü aşama olan son aşama sürekli dönme evresi olarak da adlandırılmaktadır. Bu aşamada gemiye etkileyen hidrodinamik kuvvetler arasında yeni bir denge kurulmuş olduğundan dolayı gemi hızı ve yarıçapı sabit kalan sürekli bir dairesel dönme hareketi gerçekleştirir (Sabuncu, 1985).

2.2. Zigzag manevrası testi

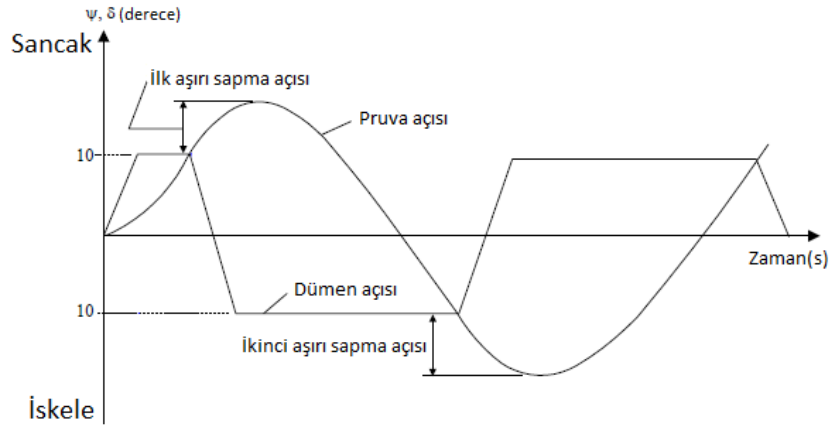
Zigzag manevrası aynı zamanda "Kempf manevrası" olarak da adlandırılır. Bu manevra testinden elde edilen sonuçlar dümenin gemiyi ne ölçüde kontrol edebildiğini gösterir. Ayrıca $10^\circ/10^\circ$ zigzag testi Şekil 3'te görüleceği gibi geminin başlangıç dönme kabiliyetini belirler.



Şekil 3. $10^\circ/10^\circ$ zigzag testi ile belirlenen başlangıç dönme kabiliyeti (Zaojian, 2006).

Zigzag manevrası performansının dümenin etkinlik derecesine bağlı olduğu kadar geminin stabilite karakteristiğine de bağlı olduğu söylenmiştir (SNAME, 1989). Zigzag deneyinde Şekil 4'te gösterildiği gibi sabit bir hızla ve doğrusal rotada ilerleyen bir geminin dümeni yaklaşık bir dakika sonra hızlı bir şekilde sabit bir açıya (10° veya 20°) döndürülür. Geminin pruva açısı (ψ) dümen açısı (δ) ile aynı açıya gelene kadar dümen açısı sabit tutulur. Pruva açısı dümen açısıyla eşitlendiği anda dümen tam ters yönde aynı açıya getirilerek bu işlemin tercihen beş defa tekrarlanması gerektiği tavsiye edilmiştir (ITTC-Maneuvering Committee, 2002). Bu deney çekme tanklarında SHT'lerle gemi modelleri kullanılarak veya ölçme cihazlarıyla donatılmış tam ölçekli gemilerin seyir tecrübeleri esnasında gerçekleştirilebilir. IMO gemilerin başlangıç dönme kabiliyetlerini belirlemek üzere $10^\circ/10^\circ$, dönme

kontrol kabiliyetlerini belirlemek için ise $20^\circ/20^\circ$ zigzag manevra testlerinin uygulanması gerektiğini bildirmiştir (TMMOB Gemi Mühendisliği El Kitabı, 2011).



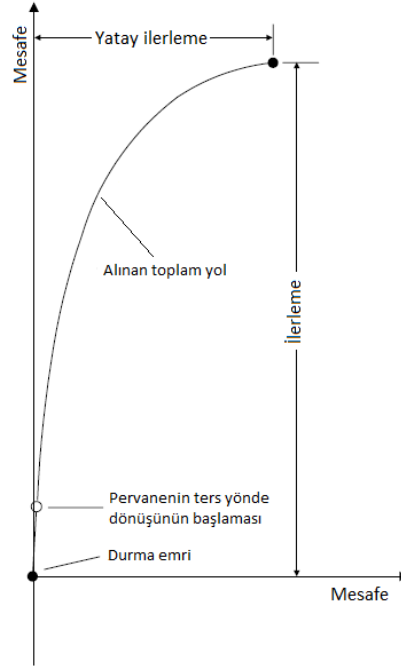
Şekil 4. Standart $10^\circ/10^\circ$ zigzag manevrası testi.

Zigzag manevra testleri sonucunda başlangıç dönme süresi, aşırı dönme açısı (overshoot angle), ve dönme kontrol süresi gibi bazı önemli parametreler elde edilmiş olur. Başlangıç dönme süresi, dümenin istenilen açığa döndürülmesinden sonra gemi pruvasının bu açığa ulaşması için geçen süredir. Bu süre doğrudan geminin rota değiştirmedeki hızını ölçer ve dümen etkinliğinin artmasına bağlı olarak artar. Deney esnasında pruva açısının kırılan dümen açısına ulaşmasından sonra dümenin diğer alabandaya kırılmasıyla gemi üzerindeki dönme ataleti sebebiyle anında diğer tarafa dönüş yapamaz. Dümenin aksine gemi bir süre daha ters yönde yol almaya devam eder ve maksimum bir pruva açısı değerine ulaşır. Dümenin diğer alabandaya kırıldığı andan itibaren ölçülen azami rota (pruva) açısı değerine aşırı dönme açısı denmektedir. Dönme kontrol süresi ise dümenin zıt yöne çevrilmesi ile gemi pruva açısının en büyük açığa ulaşmasına kadar geçen süredir.

Zigzag testinden elde edilen parametrelerin bilinmesi özellikle dar kanallarda çalışan gemiler için büyük önem arz etmektedir. Çünkü yatay olarak sınırlandırılmış sulara gemiyi sevk eden kişi dümeni bir taraftan diğer tarafa kırdığı zaman geminin ne kadarlık bir aşırı dönme açısı ile döneceğini bilerek önceden manevrasını en uygun bir şekilde gerçekleştirebilir. Ayrıca gemilerde hızın artmasıyla birlikte ardışık dümen kırmalar arasındaki süre azalmakta, buna karşılık aşırı dönme açısı artmaktadır. Denizaltılarda ise zigzag deneyi hem yatay hem de düşey düzlemlerde gerçekleştirilir. Düşey düzlemde yapılacak olan zigzag deneylerinin operasyonel anlamda denizaltılar için daha önemli olduğu söylenmiştir. Çünkü denizaltılar gerektiğinde düşey olarak kısıtlanmış sulara bazı operasyonlar gerçekleştirmek zorunda kalabilir. Bu yüzden düşey düzlemde aşırı dönme baş-kıç vurma açısı ve aşırı dönme esnasındaki derinlik değişimi denizaltılar için çok önemli iki parametredir (SNAME, 1989).

2.3. Durma manevrası testi

IMO'nun önerdiği standart manevra testlerinden üçüncüsü ise durma manevrası testidir. Bu testte sabit servis hızıyla ilerleyen gemiye tornistan komutu verildikten sonra tam olarak durması için gerekli olan süre ölçülür. Bu test esnasında Şekil 5'te görüldüğü gibi alınan toplam yol, ilerleme ve yatay ilerleme gibi geminin katettiği mesafeler elde edilmiş olur.



Şekil 5. Standart durma manevrası testi.

2.4. Doğrusal rota stabilitesi koşulunun teorik olarak belirlenmesi

Çalışmanın ilk bölümünde lineer hareket denklemleri anlatılırken belirtildiği gibi ileri öteleme hareketi, yanal öteleme ve savrulma hareketi denklemlerinden bağımsız olarak çözülmektedir. Diğer iki denklemin birlikte çözülmesiyle yatay hız bileşeni ve savrulma açılma hızı bileşeninin çözümü şu şekilde olacaktır (TMMOB Gemi Mühendisliği El Kitabı, 2011):

$$\begin{aligned} v &= v_1 e^{\sigma_1 t} + v_2 e^{\sigma_2 t} \\ r &= r_1 e^{\sigma_1 t} + r_2 e^{\sigma_2 t} \end{aligned} \quad [1]$$

Burada v_1, v_2, r_1, r_2 integrasyon sabitlerini, σ_1 ve σ_2 ise stabilite indislerini temsil etmektedir. Her iki stabilite indisi de negatif değere sahipse, v ve r değişkenleri zamanla sifıra yaklaşacaktır. Bu değerlerin sifıra yaklaşması geminin doğrusal stabiliteye ulaştığını göstermektedir. Stabilite indislerinden herhangi birisi pozitif ise v ve r parametreleri zamanla artacak ve dümen orta konumunda iken bile gemi dönmeye devam edecektir. Bulunan çözümlerin hareket denklemlerinde yerine konmasıyla ikinci dereceden,

$$A\sigma^2 + B\sigma + C = 0 \quad [2]$$

denklemini elde edilmiş olur. Bu denklemde,

$$\begin{aligned} A &= (m - Y_{\dot{v}})(I_z - N_{\dot{r}}) - (mx_G - Y_{\dot{r}})(mx_G - N_{\dot{v}}) \\ B &= -Y_v(I_z - N_{\dot{r}}) + N_v(mx_G - Y_{\dot{r}}) + (m - Y_{\dot{v}})(mx_G U - N_r) - (mU - Y_r)(mx_G - N_{\dot{v}}) \\ C &= -Y_v(mx_G U - N_r) + N_v(mU - Y_r) \end{aligned} \quad [3]$$

olarak verilmiştir. [2] no.'lu denklemin iki farklı kökü bulunmaktadır. Bunlar,

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \left[-\frac{B}{A} \pm \sqrt{\left(\frac{B}{A}\right)^2 - 4\frac{C}{A}} \right] \quad [4]$$

olarak elde edilir. Bu iki kokün de negatif olabilmesi için $B/A > 0$ ve $C/A > 0$ koşulları mutlaka sağlanmalıdır. Elde edilen bu koşullar dikkate alınarak doğrusal rota stabilitesi koşulu şu şekilde ifade edilebilir:

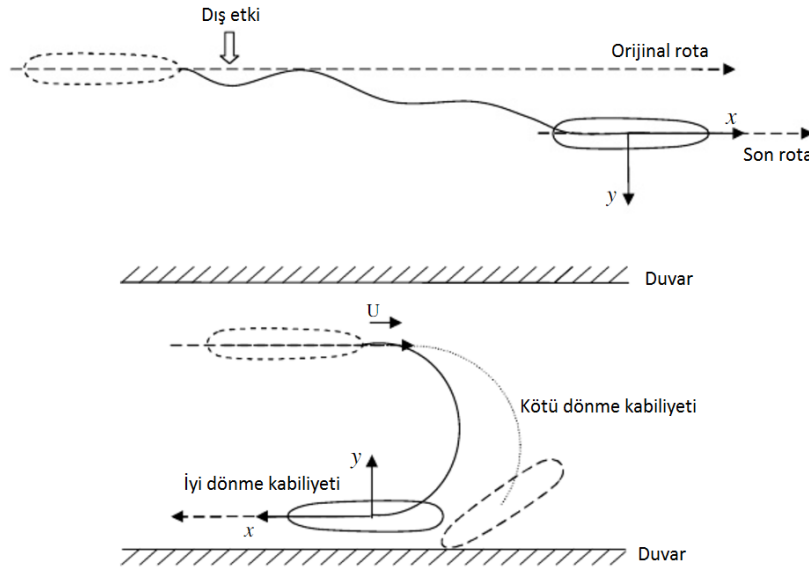
$$C = -Y_v(mx_G U - N_r) + N_v(mU - Y_r) > 0 \quad [5]$$

[5] no.'lu denklem şu şekilde de gösterilebilir:

$$\frac{N_r - mx_G U}{Y_r - mU} > \frac{N_v}{Y_v} \quad [6]$$

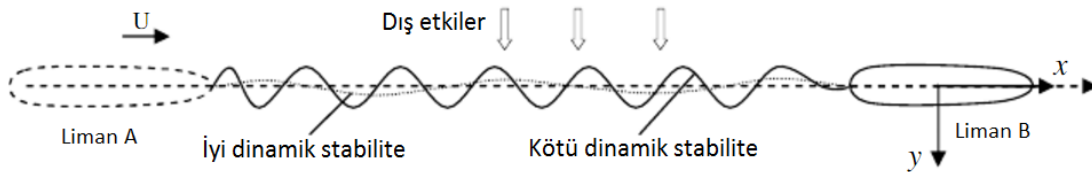
Görüldüğü gibi doğrusal stabilite kriteri (C) geminin ağırlık merkezinin yeri, servis hızı ve dört adet lineer manevra türevi ile belirlenebilmektedir. Pratikte bir gemi dizayn edilirken bu değer genellikle sıfıra yakın ancak negatif değerde olması istenir. Böylece geminin biraz daha az rota stabilitesine sahip olmasına karşın manevra kabiliyeti arttırılarak daha az dümen hareketiyle manevra yapması istenir.

Gemilerde doğrusal rota stabilitesi ile dönme kabiliyeti arasında belirli bir dereceye kadar ters orantı söz konusudur. Genellikle rota tutma kabiliyeti güçlü olan gemilerin dümen dinleme becerileri düşüktür. Buna karşılık dönme kabiliyeti yüksek olan gemilerin de doğrusal bir rotada dengeli olarak kalabilmeleri için sürekli dümen müdahalesi gerekir. Bir geminin rota tutma (doğrusal rota stabilitesi) ve dönme kabiliyetleri Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Gemilerde rota tutma (üstte) ve dönme kabiliyeti (altta) (Zaojian, 2006).

Genellikle sabit doğrusal rotalarda uzun mesafeler kateden açık deniz gemilerinde iyi derecede rota tutma kabiliyeti ve dinamik stabilite aranır. Çünkü bu tip gemiler rotalarından saptıkça gemiye etkiyen direnç artar ve bu da daha fazla yakıt sarfiyatına neden olur (bkz. Şekil 7).



Şekil 7. Düz rotada dış etkilere maruz kalan bir geminin izlediği farklı rotalar (Zaojian, 2006).

Rota tutma kabiliyeti yüksek olan büyük gemilerde liman, körfez vb. yerlerde manevra kabiliyetlerini arttırabilmek için baş ve kıç iticiler kullanılmaktadır. Büyük gemilerin çalıştığı alanlara kıyasla daha kısıtlı sularda veya deniz trafiğinin yoğun olduğu yerlerde çalışan gemilerde ise rota tutma kabiliyeti yerine daha çok manevra yapabilme yeteneği aranır. Tüm bunlarla birlikte iyi manevra yapabilen ve rota tutma kabiliyetine sahip bir gemi dizaynı da yapmak mümkündür. Geminin kıç tarafında yeri optimum olarak belirlenmiş ve alanı da yeterince büyük olarak tasarlanmış bir dümen geminin dönme manevrası kabiliyetini arttırdığı gibi doğrusal rota stabilitesini de düzenler. Ayrıca boyu uzun ve genişliği az olan narin formdaki gemilerde T/L oranının arttırılması dönme manevrası performansına herhangi bir olumsuz etki yapmaksızın rota tutma kabiliyetini arttırır. Manevra ve rota tutma kabiliyetlerini etkileyen hususları sırasıyla özetlemek gerekirse, gemi ağırlık merkezinin mastoriden kıça doğru olması, gemi kıç formunun dolgun olması ve kıç tarafta skeglerin bulunması gibi özellikler rota tutma kabiliyetini; dümen alanının yeterince büyük olması, dümen konumun ve formunun optimum olması, gemi kıç formunun narin olması, gemide taşınması mümkün olan ağırlıkların mastoride toplanarak kütle atalet momentinin azaltılması, blok katsayısının yüksek olması ve B/L oranının artması gibi hususlar geminin manevra kabiliyetini arttırır (Sabuncu, 1985).

2.5. Rota tutma ve dönme kabiliyeti indekslerinin belirlenmesi

Manevra yapan bir gemiye ait hareket denklemleri ilk bakışta her ne kadar basit görünse de denklemler içerisinde yer alan manevra türevlerinin sayısal ya da deneysel olarak belirlenmesi zor olduğundan geminin manevra yeteneklerini belirleyebilmek için pratikte kullanılabilecek bazı matematiksel formülasyonlar türetilmiştir. Bu bölümde öncelikle Nomoto modeli (Nomoto, 1966) olarak bilinen K ve T indekslerine bağlı formülasyonların elde edilme yöntemi, daha sonra bu indekslerin fiziksel olarak ne ifade ettiklerinden bahsedilecektir.

Nomoto modelinde K ve T indekslerine bağlı olarak lineer hareket denklemlerinden şu şekilde ikinci dereceden bir diferansiyel denklem türetilmiştir [Nomoto, 1966]:

$$T_1 T_2 \ddot{r} + (T_1 + T_2) \dot{r} + r = K \delta + K T_3 \dot{\delta} \quad [7]$$

Burada,

$$T_1 T_2 = \frac{(m - Y_{\dot{v}})(I_z - N_{\dot{r}}) - (m x_G - Y_{\dot{r}})(m x_G - N_{\dot{v}})}{-Y_v(m x_G U - N_r) + N_v(m U - Y_r)}$$

$$T_1 + T_2 = \frac{-Y_v(I_z - N_{\dot{r}}) + N_v(m x_G - Y_{\dot{r}}) + (m - Y_{\dot{v}})(m x_G U - N_r) - (m U - Y_r)(m x_G - N_{\dot{v}})}{-Y_v(m x_G U - N_r) + N_v(m U - Y_r)}$$

$$K = \frac{-Y_v N_{\delta} + N_v Y_{\delta}}{-Y_v(m x_G U - N_r) + N_v(m U - Y_r)}$$

$$T_3 = \frac{-Y_{\delta}(m x_G - N_{\dot{v}}) + N_{\delta}(m - Y_{\dot{v}})}{-Y_v N_{\delta} + N_v Y_{\delta}}$$

olarak ifade edilmiştir. [7] no.'lu denklemde gösterilen diferansiyel denklem aslında ikinci mertebeden bir cevap modelidir ve dümenin hareketine karşılık teknenin yapacağı dönme hareketini belirler. Bu modelin daha da sade bir forma dönüştürebilmesi için gemilerde baş-kıç simetrisi olduğu varsayımı yapılarak [7] no.'lu denklem birinci mertebeden bir cevap modeline indirgenebilir. Baş-kıç simetrisi yaklaşımı yapıldığında,

$$x_G \approx 0, Y_r \approx 0, Y_{\dot{r}} \approx 0, N_v \approx 0, N_{\dot{v}} \approx 0$$

olur. Böylece,

$$K \approx -\frac{N_\delta}{N_r}, \quad T_1 + T_2 \approx -\frac{I_z - N_{\dot{r}}}{N_r} - \frac{m - Y_{\dot{v}}}{Y_v}, \quad T_3 \approx -\frac{m - Y_{\dot{v}}}{Y_v}, \quad T_1 + T_2 - T_3 \approx -\frac{I_z - N_{\dot{r}}}{N_r}$$

olarak elde edilmiş olur. Ayrıca yapılan sadeleştirmelerle birlikte lineer hareket denklem sistemi içerisinde yer alan savrulma hareketi denklemi,

$$(I_z - N_{\dot{r}})\dot{r} + N_r r = N_\delta \delta \quad [8]$$

olarak yazılabilir. Bu denklem aşağıdaki formda tekrar yazılacak olursa,

$$-\frac{I_z - N_{\dot{r}}}{N_r}\dot{r} + r = -\frac{N_\delta}{N_r}\delta \quad [9]$$

elde edilir. Rota tutma kabiliyeti indeksi, $T = T_1 + T_2 - T_3$ şeklinde yazılırsa sonuç olarak,

$$T\dot{r} + r = K\delta \quad [10]$$

denklemini elde edilmiş olur. Bu denklem de yer alan K ve T değerleri manevra indeksleri olarak adlandırılırlar. K indeksi geminin dönme kabiliyetini göstermektedir. Sabit dönme rejimine ulaşmış bir gemide ($\dot{r} = 0$) açılal dönme oranı $r = K\delta$ olacaktır. Aynı denklemde yer alan T indeksi ise geminin rota tutma ve dümen dinleme kabiliyetini (dinamik stabilite) ifade eder.

2.6. Gemilerin manevra performans ölçütlerinin değerlendirilmesi

Gemi manevra performansını lineer manevra türevleri ve bazı gemi parametrelerine bağlı olarak genel anlamda değerlendirebilmek için kullanılan ifadeleri tekrar yazacak olursak manevra indeksleri,

$$K \approx -\frac{N_\delta}{N_r}, \quad T \approx -\frac{I_z - N_{\dot{r}}}{N_r} \quad [11]$$

doğrusal rota stabilitesi koşulu,

$$C = -Y_v(mx_G U - N_r) + N_v(mU - Y_r) > 0 \quad [12]$$

ve sabit dönme oranı ile sabit dönme dairesi çapı,

$$r_0 = \frac{-Y_v N_\delta + N_v Y_\delta}{C} \delta_0, \quad D_0 = 2 \frac{U_0}{r_0} \quad [13]$$

olarak verilmektedir. K indeksi ne kadar büyükse gemi o derecede iyi dönme kabiliyetine sahip olurken, T indeksi de ne kadar küçükse gemi o kadar iyi rota tutma kabiliyetine sahip olur. K büyürken T'nin küçülmesi başlangıç dönme (initial turning) ve rota değiştirme (course-changing) kabiliyetini artırır. Doğrusal rota stabilite indeksi olan C ne kadar büyükse gemi o kadar iyi dinamik stabiliteye sahip olur. [11] no.'lu denklemde görüldüğü gibi K indeksi N_δ ile doğru orantılı olduğundan, dümen açısına bağlı

olarak savrulma momentinde meydana gelişim arttıkça gemi daha iyi dönme manevrası yapacaktır. Bu da dizayn edilecek dümenin yüzey alanını oldukça büyük tutarak maksimum savrulma momentini verecek şekilde tasarlanması gerektiği anlamına gelmektedir.

T indeksi $I_z - N_r$ ile doğru orantılı olduğu için $I_z - N_r$ terimindeki artış T indeksini de arttıracak ve doğrusal rota stabilitesinin azalmasına sebep olacaktır. Bu yüzden gemi üzerindeki yük dağılımı mümkün olduğunca gemi ortasına (midship) yakın olursa doğrusal rota stabilitesi o kadar iyileşecektir. Stabilitate kriterinin pozitif ve büyük bir değer olması isteniyorsa Y_v ve N_r türevlerinin mümkün olduğunca büyük ve negatif, N_v türevinin ise mümkün olduğunca büyük ve pozitif bir değere sahip olması gerekir. N_v türevinin pozitif bir değer alabilmesi için pozitif değerde olan yanal hızın (v) tekne üzerinde pozitif savrulma momenti, negatif değere sahip yanal hızın ise negatif savrulma momenti oluşturması gerekir. Bu da geminin kış bölgesinin baş kısma göre daha dolgun olmasıyla gerçekleşecektir. Ayrıca [12] no.'lu denklemden ağırlık merkezinin (x_G) başa doğru olmasının (negatif değerde) doğrusal rota stabilitesini arttıracığı çıkarımı yapılabilir.

[13] no.'lu denklem incelendiğinde ise, dümenin sancak tarafına kırılması pozitif yön olarak kabul edilirse Y_δ negatif, N_δ ise pozitif olur. Tablo 2'de görüleceği üzere Y_v değeri zaten her zaman negatif ve büyük bir değere sahip olacağı için N_v değerinin pozitif olması durumunda sabit dönme oranı küçülecek, bu da dönme çapını arttıracaktır. Dönme çapının artması geminin dönme kabiliyetinin daha da kötüleştiğini gösterir.

Tablo 2. Lineer manevra türevlerinin büyüklük mertebeleri ve işaretleri.

Türev	$Y_{\dot{v}}$	Y_v	$N_{\dot{r}}$	N_r	$Y_{\dot{r}}$	Y_r	$N_{\dot{v}}$	N_v
Mertebe	Büyük	Büyük	Büyük	Büyük	Küçük	Küçük	Küçük	Küçük
İşaret	Negatif	Negatif	Negatif	Negatif	Belirsiz	Belirsiz	Belirsiz	Belirsiz

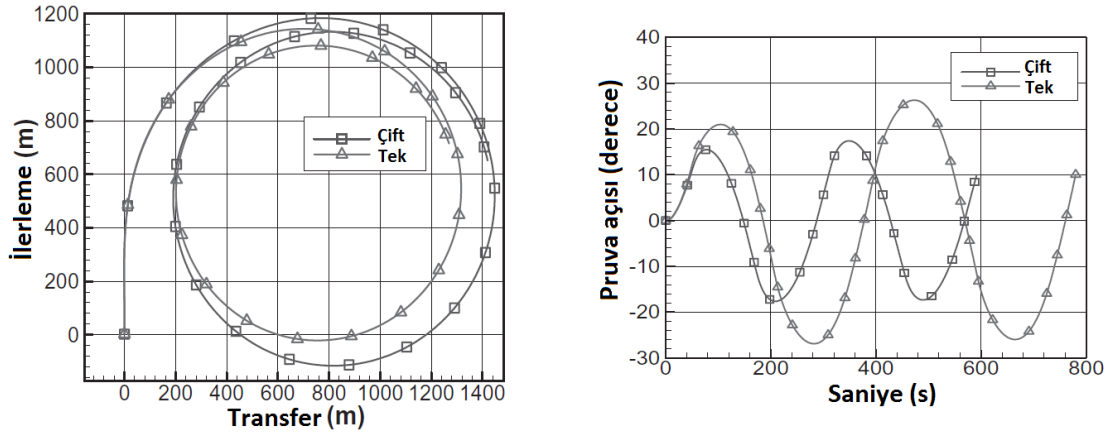
Tablo 2'de gösterilen lineer manevra türevlerinde Y_v , N_v , Y_r , N_r türevleri sönüm (damping) katsayıları, $Y_{\dot{v}}$, $N_{\dot{v}}$, $Y_{\dot{r}}$, $N_{\dot{r}}$ türevleri ise ek kütle (added mass) katsayıları olarak adlandırılmaktadır. Burada mertebesi küçük olan manevra katsayıları (Y_r , $Y_{\dot{r}}$, N_v , $N_{\dot{v}}$) eğer gemi baş-kış simetrisine yakın bir forma sahipse sıfır olarak alınabilir. Ayrıca gemiler genellikle xz düzlemine göre (yani boy simetri düzlemine göre) simetrik oldukları için X_r , $X_{\dot{r}}$, X_v , $X_{\dot{v}}$ türevleri de sıfıra eşit olur. Aynı şekilde yanal ötelenme ve savrulma hareketi için çözülecek denklemlerde Y_u , $Y_{\dot{u}}$, N_u , $N_{\dot{u}}$ türevleri de sıfır olur.

3. Manevra performans tahminlerini etkileyen iç ve dış faktörler

Gemiler denizde yol alırken bir takım iç ve dış etkilere maruz kalırlar. Bu etkilere bağlı olarak da gemilerin manevra performansları değişiklik gösterebilir. Maruz kalınan bu etkileri iki ana başlık altında toplamak mümkündür: gemi dizaynına bağlı iç etkiler ve çevre kaynaklı dış etkiler. İç etkiler geminin dizaynı ve görev tanımı ile ilgiliyken, dış etkiler ise geminin seyri çevre şartlarına göre değişiklik gösterir. İnsan faktörü gibi dolaylı etkiler de bir geminin manevra performansında önemli role sahiptir (Wagenaar, 1970; ABS, 2006), ancak bu konu çalışmanın kapsamı dışında yer almaktadır. Bundan sonraki bölümlerde gemilerin manevra performanslarını etkileyen iç ve dış faktörler alt ana başlıklar halinde incelenmiştir. İç etkiler gemi dizaynına bağlı pervane, dümen, gemi formu ve ölçek etkisini içerirken; sığ su, dar kanal ve dalga etkileri de çevre kaynaklı dış etkiler başlığı altında toplanmıştır.

3.1. Pervane ve dümen etkisi

Gemilerin manevra performansı, kullanılan sevk sistemlerine ve takıntılara bağlı olarak değişiklik gösterir. Özellikle iç sularda ve dar kanallarda çalışan gemilerde manevra performansı öncelikli bir konu olduğundan bu gemilerde azimut pervane, kış ve baş itici gibi tahrik sistemleri sıklıkla kullanılır. Hatvesi kontrol edilebilen pervaneler sabit kanatlı pervanelere göre manevra kabiliyeti açısından daha avantajlıdır. Sığ suda kullanılan pervane, suyun derinliğinin az olmasından dolayı kısıtlı boyutlarda dizayn edileceği için bu gemilerde manevra kabiliyetini genellikle arttıran daha küçük boyutlarda çift pervaneli sevk sistemleri tercih edilir. Mascio vd. (2011) tarafından çift pervaneli bir savaş gemisi için bir dizi HAD analizi yapılarak geminin manevra kabiliyeti belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada aynı geminin tek pervaneli formu için regresyon yöntemi ile türetilmiş ampirik ifadelerin çift pervaneli durumda doğru sonuçlar vermediği belirtilmiştir. Pervane sayısının manevra performansına olan etkisinin incelendiği bir başka çalışmada ise Kim vd. (2007) bir konteyner gemisinin Şekil 8'de görüldüğü gibi çift pervaneli formunun tek pervaneliye göre dönme yeteneğinin daha kötü fakat rota tutma ve rota değiştirme kabiliyetlerinin daha iyi olduğunu göstermişlerdir. Her iki durum için de manevra katsayıları elde edilerek doğrusal rota stabiliteyi hesaplanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. DHM testi simülasyonlarından elde edilen sonuçlara göre geminin çift pervaneli ve çift dümenli durumdayken daha iyi doğrusal stabilizeye sahip olduğu belirtilmiştir.



Şekil 8. Tek ve çift pervane kullanımının dönme (solda) ve rota tutma (sağda) performansına etkisi (Kim vd., 2007).

Gemilerin birçoğunda manevra hareketi genellikle kış tarafta bulunan dümen(ler) yardımıyla sağlanmaktadır. Dümenlerin rota değişimi için kullanımı dar kanallarda açık denizlere kıyasla daha fazla olmaktadır. Kullanılan dümenin sayısı, tipi, dönme hızı, yüzey alanı, yan oranı ve açısı gibi parametreler teknenin hidrodinamik karakteristiğini doğrudan etkilemektedir ve manevra kabiliyeti açısından da son derece önemlidir. Özellikle dümenin yüzey alanındaki artış manevra kabiliyetini olumlu yönde etkilese de ıslak alan artacağı için takıntı direnci de artmış olacaktır. Bu yüzden kullanılacak dümen formu ile ilgili ön dizayn aşamasında etkili bir optimizasyon çalışması yapılması gereklidir. Dümen formu konusunda Yang vd. (2015) sayısal ve deneysel çalışmalar yaparak bükümlü (twisted) ve normal formdaki dümenlerin manevra performansına olan etkisini değerlendirmişlerdir. Ancak daha önce bu konuda yapılan çalışmaların aksine, iki dümen formu arasında dönme manevra kabiliyeti açısından bariz bir fark olmadığını belirtmişlerdir. Babu ve Krishnankutty (2015) ise balık kuyruğu şeklindeki bir

dümen profili (fish tail shaped rudder) ile geleneksel dümen profilinin manevra performansına olan etkilerini karşılaştırmışlardır. Farklı dümen açılarında yapmış oldukları HAD analizleri ile balık kuyruğu dümen profilinin dönme manevrası performansını arttırdığı sonucuna ulaşmışlardır (bkz. Şekil 9). Bal (2011) ise çalışmasında iki boyutlu balık kuyruğu dümen profilinin hidrodinamik performansa olan katkısını sınır elemanları yöntemi ile incelemiştir.

Geleneksel dümen				
Dümen Açısı	Sürekli Dönme Çapı (m)	Taktik Çap (m)	İlerleme (m)	Transfer (m)
0	-	-	-	-
10	1175.49	1189	721.3	669.1
20	570.46	584.45	410.4	347.8
30	369.44	383.4	307.08	241.1
35	307.87	321.8	275.43	208.4
Balık kuyruklu dümen				
0	-	-	-	-
10	775.82	789.82	515.9	456.8
20	372.99	386.99	308.9	242.9
30	235.1	249	238	169.7
35	194.44	208.4	217.1	148.1



Geleneksel Dümen Profili



Balık Kuyruklu Dümen Profili

Şekil 9. Geleneksel ve balık kuyruklu dümen formunun dönme manevrasına etkilerinin karşılaştırılması (Babu ve Krishnankutty, 2015).

Başka dümen formlarının incelendiği bir çalışmada ise üç farklı dümen profilinin (NACA, Wedge Tail, IFS) hem dönme hem de zigzag manevralarına etkileri sayısal olarak incelenmiştir (Liu, J. vd., 2016). Dümene yüzey normali yönünde etkiyen kuvvet arttıkça, dönme manevrasında ilerleme ve taktik çapın, 10/10 ve 20/20 zigzag testinde ise aşırı sapma açılarının azaldığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca NACA profilinin üç farklı dümen tipi arasında en verimli (azami C_L/C_D oranını veren) dümen profili olduğu belirtilmiştir.

Dümen yerleşiminin de geminin manevra performansı üzerinde etkisi olduğu bilinmektedir. Çift dümenin yeni bir konfigürasyonla kullanıldığı bir çalışmada, dümenler Şekil 10'da görüleceği gibi pervanenin iki yanına yerleştirilerek bir gemiye ne ölçüde enerji tasarrufu sağladığı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir (Sasaki vd., 2016). Dümen yerleşimi bu şekilde olduğunda geminin yaklaşık %7-8 civarında enerji tasarruf ettiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 10. Pervanenin yanında bulunan ikili dümen konfigürasyonu (Sasaki vd., 2016).

3.2. Gemi formu etkisi

Gemi formundaki farklılıklar manevra yapan bir gemi üzerinde oluşan hidrodinamik kuvvetler ve momentlerin büyük oranda değişmesine neden olmaktadır. Manevra performansı açısından genellikle uzun ve narin formların rota tutma kabiliyeti geniş ve dolgun gemilere göre daha iyi olmakta fakat dönme performansında bu durumun tam tersi geçerli olmaktadır. Ayrıca geminin trimli olması da manevra performansını etkilemektedir. Örneğin gemi başa trimli ise doğrusal rota stabilitesinin azalacağı fakat buna karşılık dönme performansının artacağı, eğer kıçta trimli ise bu durumun tam tersinin olacağı belirtilmiştir (TMMOB, Gemi Mühendisliği El Kitabı, 2011). Ana boyutlar ve bunların oranlarının temel manevra kabiliyetleri üzerindeki etkilerini doğrusal rota dengesi ve dönme kabiliyeti açısından görebilmek için Tablo 2 incelenebilir.

Tablo 2. Gemi ana boyutlarının temel manevra kabiliyetleri üzerindeki etkileri (TMMOB Gemi Mühendisliği El Kitabı, 2011).

	Doğrusal Rota Dengesi	Dönme Kabiliyeti
Boy [L]	+	-
Genişlik[B]	-	+
Su Çekimi [T]	+	-
L/B	+	-
B/T	-	+

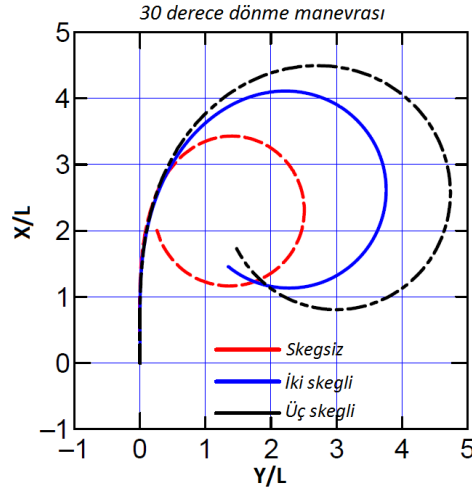
Genellikle sığ sularda çalışan ve taşıma kapasiteleri gemilere nazaran çok daha fazla olan duba sistemlerinin manevra performanslarının incelenmesiyle ilgili birçok sayısal ve deneysel çalışma yapılmıştır (Luo ve Zhang, 2007; Koh vd., 2008 a,b,c; Maimun vd., 2011; Koh ve Yasukawa, 2012). Bu çalışmaların içerisinde Koh vd. (2008c) tarafından farklı duba sistemi konfigürasyonları için incelemeler yapılmış ve dubaların uzunlamasına sıralandığı zaman enlemesine sıralanmasına kıyasla daha az güç harcanarak tahrik edilebildiği söylenmiştir. Manevra performansı açısından ise duba sistemlerinin uzunlamasına boyları arttırıldığında atalet momentin de artmasından ötürü taktik çap, ilerleme ve transfer mesafelerinde artış olduğu belirtilmiştir. Aynı şekilde dubalar uzunlamasına sıralandığında yanyana sıralanmaya kıyasla daha az direnç oluşturacağı için durma mesafesinin de arttığı sonucuna varılmıştır. Benzer bir çalışmada ise bu sefer duba sistemleri asimetrik olarak dizilerek manevra performansları incelenmiştir (Koh vd., 2008 a). Duba sayısının bir tarafta daha fazla olduğu asimetrik sistemlerde iskele ve sancak yönüne dönüşlerde dümen ve pervaneye etkiyen asimetrik kuvvetlerden dolayı her iki yöndeki dönme yarıçaplarının da farklılık gösterdiği belirtilmiştir. Duba sistemleri dışında gemilerin ana boyutlarındaki değişimin manevra performansına olan etkilerinin incelendiği başka bir çalışmada ise genişlik, su çekimi, su altı hacmi ve hacim merkezinin boyuna yeri, dümen alanı ve gemi boyu gibi parametreler değiştirilerek dönme ve zigzag testleri sayısal olarak gerçekleştirilmiş ve geminin optimum dönme manevrası belirlenmiştir (Perez ve Clemente, 2007). Şekil 11'de görüleceği gibi parametreler tek başına veya kombine olarak $\pm 5\%$ oranında değiştirilip geminin dönme ve zigzag rotasına etkileri incelenmiştir.

	Orijinal	+5%B, -5%T	+5%T, -5%B	+5% LCB	-5% LCB	+5% DÜMEN	-5% DÜMEN
İlerleme	3.44	3.35	3.56	3.37	3.50	3.39	3.49
Taktik çap	4.80	4.61	5.01	4.71	4.85	4.73	4.86
Aşırı sapma	14.10	14.80	13.50	14.20	14.20	14.20	14.00
	Orijinal	+5% L, -5% B	-5% L, +5% B	+5% L, -5% T	-5% L, +5% T		
İlerleme	3.44	3.57	3.29	3.50	3.38		
Taktik çap	4.80	5.13	4.43	4.97	4.61		
Aşırı sapma	14.10	12.56	16.12	13.17	15.16		

Şekil 11. Gemi form parametrelerinin ilerleme, taktik çap ve aşırı sapma açısı üzerindeki etkileri (Perez ve Clemente, 2007).

Yapılan çalışma sonucunda gemi boyundaki azalmanın zigzag kabiliyetini olumsuz etkilediği görülmüştür. Gemi genişliğinin artmasıyla birlikte boyunun kısılması, ilerleme mesafesi ve taktik çapı azaltırken aşırı sapma (overshoot) açısının artmasına neden olmuştur. Su çekimindeki değişimin manevra kabiliyeti üzerinde net olarak bir etkisi görülmemiştir. Gemi su altı hacim merkezinin (LCB) gemi baş tarafına doğru kayması dönme manevrasını olumlu yönde etkilemiş, zigzag manevrası üzerinde ise az bir etkisi olmuştur. Dümen alanının artması manevra kabiliyetini arttırırken, diğer yandan geminin ihtiyacı olan gerekli gücün artmasına da sebep olmuştur.

Gemi manevra kabiliyetini belirleyen hidrodinamik kuvvetler daha önce de belirtildiği gibi genellikle geminin ana boyutlarına ve bunların oranlarına bağlı olarak değişmektedir. Bunun yanısıra Şekil 12’de görüldüğü gibi geminin kıç kısmında bulunan skeglerin de rota tutma kabiliyetini arttırdığı söylenmiştir (Yasukawa vd., 2006). Doğrusal rota stabilitesi ne kadar arttırılmak isteniyorsa skeg alanının da o kadar büyütülmesi gerektiği belirtilmiştir.



Şekil 12. Skeg kullanımı ve sayısının rota tutma kabiliyeti üzerindeki etkisi (Yasukawa vd., 2006).

3.3. Model ölçeği etkisi

Manevra konusunda şu ana kadar ölçek etkisinden tamamen kurtulabilmek için önerilmiş herhangi bir yöntem veya prosedür bulunmamaktadır (ITTC-Manoeuvring Committee, 2014). ITTC farklı model deney havuzlarından topladığı verilerle yapmış olduğu değerlendirmeler sonucunda, su derinliğine bakılmaksızın, deneylerde kullanılan ortalama gemi modeli boyunun 3 metre olduğunu söylemiştir.

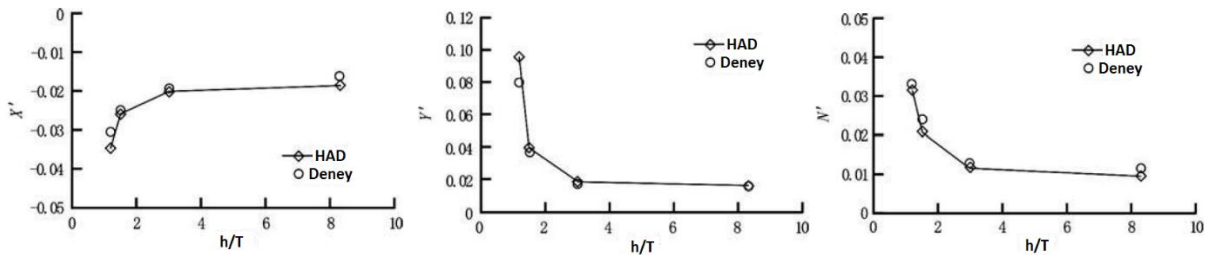
Ancak su derinliği dikkate alındığında sığ suda yapılan deneylerde model boyunun ortalama 3.6 metre, derin suda yapılan testlerde ise ortalama 4.4 metre olduğu belirtilmiştir. DHM deneylerinde ise statik sürüklenme testi yapılırken model boyunun ortalama 4.1 metre, harmonik testlerde 4.9 metre olduğu söylenmiştir. DKT testlerinde ise ortalama model boyunun 3.9 metre olduğu belirtilmiştir (ITTC-Manoeuvring Committee, 2017). Son yıllarda yapılmış olan çalışmalarda dümene ve tekneye etkiyen kuvvetler üzerindeki ölçek etkisi ayrı ayrı incelenmiştir. Shen vd. (2010), yapmış oldukları HAD hesaplamalarıyla kavitasyon oluşumu, sınır tabaka kalınlığındaki değişim ve pervane devri farkı gibi nedenlerden dolayı geminin tam ölçekteki dönme dairesinin her zaman model ölçeğine göre daha büyük olması gerektiğini savunmuşlardır. Ancak ölçek etkisinden kaynaklanan bu durumun her zaman bu şekilde olmayacağı diğer bazı çalışmalarda görülmektedir (Yang vd., 2009; Son vd., 2010). Teknenin maruz kaldığı hidrodinamik kuvvetler üzerindeki ölçek etkisi ile ilgili Kim vd. (2003), DTMB5415 test modelinin takıntısız formu için model ölçeği ve tam ölçekte HAD simulasyonları yapmıştır. Farklı sürüklenme açıları için yapmış olduğu analizlerin sonucunda düşük sürüklenme açılarında yanal kuvvet (Y) üzerindeki ölçek etkisinin az, ancak sürüklenme açısı büyüdükçe ölçek etkisinin arttığını söylemiştir. Çünkü yanal öteleme kuvveti (Y) aslında tekne üzerindeki basınç farkını ifade ettiğinden düşük açılarda Y kuvveti, viskoz kesme gerilmesinden kaynaklanan kuvvetlere (X) göre ölçek etkisinden daha az etkilenir. Ancak açı büyüdükçe model üzerinde oluşan sınır tabaka kalınlığının tam ölçeğe göre tamamen farklı bir hale gelmesinden dolayı sınır tabaka içerisinde oluşan girdaplar farklılık gösterecek ve bu da yanal öteleme kuvvetindeki ölçek etkisini arttıracaktır. Leeuwen ve Journee (1970), British Bomberdier referans modelinin 1/55 ve 1/100 model ölçeğinde deneylerini yaparak lineer ve lineer olmayan manevra türevlerinin ölçek etkisinden ne derecede etkilendiğini incelemişlerdir. İki ölçek arasında lineer manevra katsayılarının ortalama %10, lineer olmayan katsayıların ise ortalama %45'e kadar değiştiğini belirtmişlerdir. KVLCC2 referans modeli ele alınarak yapılan bir başka çalışmada ise hidrodinamik kuvvetler, savrulma momenti ve lineer manevra katsayıları üzerindeki ölçek etkisi Şekil 13'da görüldüğu gibi statik sürüklenme testi, salt yanal öteleme ve savrulma testleri ile üç farklı model ölçeği kullanılarak HAD yöntemi ile incelenmiştir (Jin vd., 2016). Sonuç olarak ölçek etkisinin savrulma momentinde hidrodinamik kuvvetlere kıyasla daha az görüldüğu belirtilmiştir.

	HAD Sonuçları (S)				Fark ($S_{Max} - S_{Min}$)/ S_{Min}
	$\lambda = 1$	$\lambda = 58$	$\lambda = 100$	$\lambda = 225$	
Statik sürüklenme					
X'_*	-0.0075	-0.0168	-0.020	-0.028	277.7%
Y'_v	-0.214	-0.244	-0.246	-0.253	18.2%
N'_v	-0.141	-0.136	-0.140	-0.141	3.8%
Salt yanal öteleme					
Y'_v	-0.217	-0.242	-0.248	-0.255	17.5%
Y'_ψ	-0.225	-0.238	-0.239	-0.247	10.0%
N'_v	-0.147	-0.143	-0.146	-0.147	3.0%
N'_ψ	-0.0086	-0.0093	-0.0094	-0.0099	13.1%
Salt savrulma					
Y'_r	-0.056	-0.069	-0.071	-0.074	24.3%
Y'_ψ	-0.025	-0.030	-0.031	-0.034	26.5%
N'_r	-0.049	-0.051	-0.052	-0.048	7.7%
N'_ψ	-0.0061	-0.0068	-0.0070	-0.0079	22.8%

Şekil 13. KVLCC2 gemisine ait lineer manevra katsayıları üzerindeki ölçek etkisi (Jin vd., 2016).

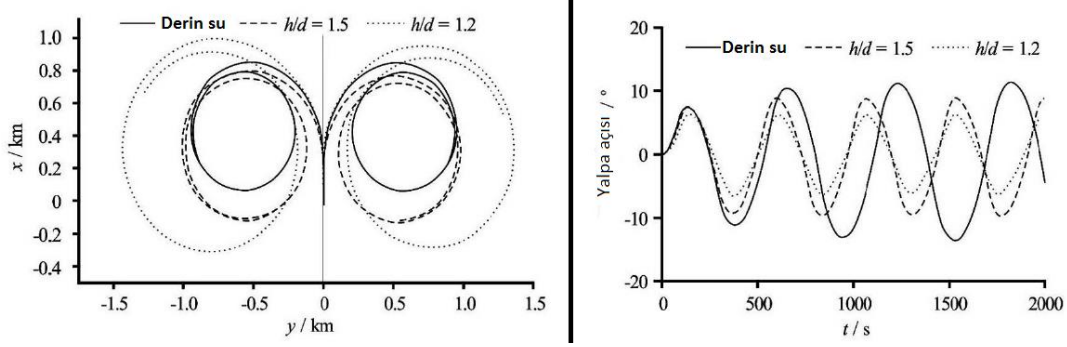
3.4. Sığ su etkisi

Sığ su koşulu değişik kaynaklarda farklı şekillerde tanımlanmıştır. Gemiler için sığ su şartı, su çekimine bağlı olarak belirlendiği için gemiden gemiye farklı derinliklerdeki sular sığ su veya derin su olarak adlandırılabilir. Açık denizlerde seyreden gemilerde su derinliğinin (h), gemi su çekimine (T) oranı derin su koşulu için genellikle $h/T > 4$ olarak alınır (ITTC-Manoeuvring Committee, 2017). Sığ suyun etkisi orta derinlikten ($1.5 < h/T < 4$) itibaren başlamakta, sığ suda ($1.2 < h/T < 1.5$) etkisi daha da artmakta ve su daha da sığlaştıkça ($h/T < 1.2$) sığ su etkisinin gemilerin manevra performansları üzerinde ciddi bir şekilde hissedilmektedir (Vantorre, 2003). Su sığlaştıkça gemi üzerine etkileyen hidrodinamik kuvvetler ve momentteki artış Şekil 14'te gösterilmiştir [Zou vd., 2010]. Toxopeus vd. (2013) sığ su koşulunda HAD yöntemi ile gerçekleştirilen simülasyonlarda direnç sonuçlarındaki doğruluğu arttırmak için kontrol hacminin oldukça geniş tutulması gerektiğini çünkü yan duvarların Y kuvveti ve N momenti üzerindeki etkisiyle sonuçların yaklaşık %10 kadar değiştiğini söylemişlerdir. Ayrıca serbest yüzey etkilerinin ihmal edilmesinin kuvvetlerin deney sonuçlarına kıyasla %5 oranında daha düşük tahmin edilmesine yol açtığı belirtilmiştir. Yine aynı çalışmada eğer gemi batma ve trim hareketlerine serbest bırakılmazsa (OSD), çok düşük Fr sayılarında bu durumun kuvvet ve moment sonuçlarını etkilemediği sonucuna varılmıştır. Son olarak, derin su koşuluna kıyasla sığ suda ileri ötelenme kuvvetinin yaklaşık iki kat, yanal ötelenme kuvvetinin altı kat ve savrulma momentinin de dört kata kadar arttığı belirtilmiştir. Başka bir çalışmada batma ve trim değerlerinin de kuvvetler ve momentteki artış kadar olmasa da derinliğin azalmasıyla birlikte az miktarda artış gösterdiği belirtilmiştir (He vd., 2016).



Şekil 14. Hidrodinamik kuvvetler ve momentin su derinliğine(h/T) göre değişimi (Zou vd., 2010).

Sığ su etkisini manevra performansı açısından değerlendiren Eloit ve Vantorre (2011), uzun ve ince bir konteyner gemisini ele alarak, sığ suda derin suya kıyasla geminin taktik çapındaki artışın rota tutma kabiliyetindeki artıştan daha fazla olduğunu göstermiştir. Tipik bir sığ su etkisi olarak bilinen bu olayda, ölçülen taktik çap genellikle sığ suda derin suya kıyasla biraz daha fazla olmakta ve bu duruma tekneye etkileyen sönüm (damping) kuvvetlerindeki artışın neden olduğu söylenmektedir (ITTC Manoeuvring Committee, 2008). Şekil 15'te bu duruma örnek olabilecek üç farklı derinlikte yapılmış dönme ve zigzag testleri gösterilmiştir, ve su derinliği azaldıkça dönme dairesinin büyüdüğü ve rota tutma kabiliyetinin arttığı görülmektedir.



Şekil 15. Su derinliğinin dönme ve zigzag manevrasına etkisi (He vd., 2016).

Bir başka çalışmada bu konuyla ilgili olarak sığ su etkisinin derinlik azaldıkça üssel olarak artış gösterebileceği söylenmiştir (Yeo vd., 2016). Koop (2015) ise üç farklı su derinliğinde ($h/T=4.82, 2.73, 1.36$) akıntı kuvvetlerine maruz kalan bir geminin manevra performansını değerlendirmiştir. Bulunan tüm sonuçları dikkate aldığı HAD yöntemi ile deneysel veriler arasında %5-8 aralığında bir bağıl hata olduğunu belirtmiştir. Ayrıca model ölçeğinde elde edilen manevra katsayılarının tam ölçeğe göre daha yüksek olduğunu söylemiştir. DTC referans modelinin kullanıldığı bazı çalışmalarda da sığ su etkisi viskoz HAD yöntemleriyle incelenmiş ve sadece Y kuvvetindeki bağıl hatanın yüksek çıktığı belirtilmiştir [He vd., 2016; Deng vd., 2016]. Ayrıca Milanov vd. (2011) ise bir katamaran modelinin doğrusal stabilitesini geniş bir Froude sayısı aralığı ve farklı derinlikler için deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmanın bir sonucu olarak hem sığ hem de derin su koşulunda incelenen katamaranın negatif doğrusal stabiliteye sahip olduğu ve Fr sayısı arttıkça teknenin doğrusal stabilitesinin de arttığı belirtilmiştir.

Sığ suda lineer manevra katsayılarının doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için Furukawa vd. (2011) tarafından bir düzeltme faktörü önerilmiştir. Düzeltme faktörünün belirlenebilmesi için bir dizi DHM test sonucu kullanılmış ve düzeltme faktörü formülasyonu h/T 'ye bağlı bir fonksiyon olacak şekilde türetilmiştir. Önerilen bu formülasyonun sığ suda manevra performansı incelenirken kullanılabilirliği belirtilmiştir. Benzer diğer bir çalışmada Rotteveel (2013), manevra performansını belirleyen matematik modeller için sığ su düzeltmeleri önermiş ve manevra katsayıları hesaplanırken derin su koşulu için kullanılan yöntemlerin sığ su için geçerli olmayacağını belirtilmiştir. Sığ suyun lineer manevra türevleri üzerindeki etkilerini inceleyen Sano vd. (2014) ise tekne ve pervaneye ait türevlerin ($Y_v, N_v, Y_{\eta}, N_{\eta}$) dümen türevlerine (Y_{δ}, N_{δ}) göre su derinliği değişiminden daha fazla etkilendiğini belirtmişlerdir.

3.5. Dar kanal etkisi

İç sular, enine ya da boyuna uzanan köprü ayakları veya gemiyi kanal içerisinde bir noktadan diğer bir noktaya taşıyan yapılar gibi kısıtlı alanlar içerebilir. Bundan dolayı yatay ve dikey olarak kısıtlanmış alanlarda (kanallarda) gemilerin manevra kabiliyetlerinin önceden doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi geminin güvenli bir şekilde manevra yapabilmesine olanak sağlar. Lataire (2014) yatay olarak kısıtlanmış suollarındaki duvar etkisini 11 farklı gemi formu ve 25 farklı duvar konfigürasyonunda deneysel çalışmalar yaparak şu şekilde ifade etmiştir:

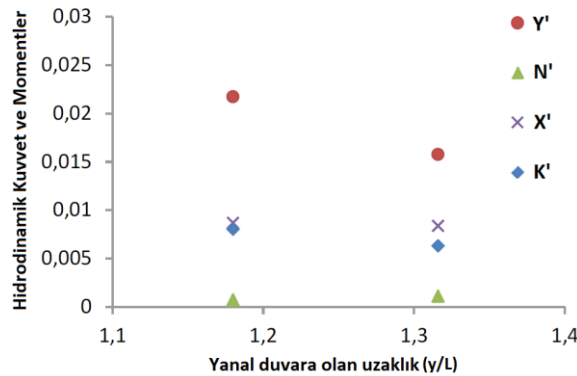
$$y_{infl} = 5b \cdot (Fr_h + 1) \quad [7]$$

Burada b gemi genişliğini ve Fr_h derinlik Fr sayısını göstermektedir. Eğer gemi ve duvar arasındaki mesafe, bu değerden büyükse yanal kısıtlamaların etkisinin ihmal edilebileceğini belirtmiştir. Hem yatay hem de düşey olarak kısıtlanmış kanallarda seyreden bir geminin kritik hızı ise blokaja bağlı olarak şu şekilde ifade edilmiştir [ITTC-Manoeuvring Committee, 2017]:

$$Fr_{h,crit} = \left(2 \sin \left(\frac{\arcsin(1 - m)}{3} \right)^{3/2} \right) \leq 1 \quad [8]$$

Burada m gemi en kesit alanının, içerisinde bulunduğu kanalın kesit alanına oranını, yani blokajı ifade etmektedir. İç sularda yüzen gemiler, kanallara girdiğinde veya demirleme esnasında, açık denizde seyreden gemiler gibi manevra yapmalarına yardımcı olacak römorkörlere ihtiyaç duymadığından kendi manevralarını başarılı bir şekilde gerçekleştirmek zorundadırlar. Özellikle duvarlara yakın dönüşlerde pervane devri yüksek tutulmamalı, küçük dümen açılarıyla kanal ortasından gidilmeye çalışılmalıdır. Aksi takdirde pervanenin akımı hızlandırmasından dolayı geminin kış bölgesi ile duvar arasında bir emme basıncı oluşacak ve gemi kanal duvarına çarpma tehlikesi ile karşı karşıya kalacaktır.

Son yıllarda yatay-düşey olarak sınırlandırılmış kanallarda gemilerin manevra performanslarının belirlenmesi birçok araştırmacı tarafından inceleme konusu olmuştur. Örneğin, Zou vd. (2011) yatay olarak sınırlandırılmış bir kanal içerisinde ilerleyen KVLCC2 gemisine etkileyen hidrodinamik kuvvetleri potansiyel ve viskoz yöntemlerle incelemiş ve sonuçları deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Sonuçlar viskoz kuvvetlerin geminin manevra kabiliyeti üzerinde yüksek etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Aynı referans modelin kullanıldığı bir başka çalışmada iki farklı viskoz çözücü ve bir potansiyel çözücü ile hesaplanan kuvvet, moment, trim ve batma değerleri karşılaştırılmıştır (Van Hoydonck vd., 2015). Potansiyel yöntemin gemi duvar etkileşimini doğru bir şekilde hesaplayamadığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca pervane devrindeki artışın duvar etkisini arttırdığı, düşük hızlarda serbest su yüzeyinin ise çok sığ su durumu haricinde sonuçları çok fazla değiştirmedeği sonucuna varılmıştır. Poojari ve Kar (2016) sığ suda ($h/T=1.5$) ilerleyen bir geminin iki farklı duvar konfigürasyonunda tekneye etkileyen hidrodinamik kuvvetler ve momentteki değişimlerini incelemiştir. Sonuç olarak Şekil 16'da görüldüğü gibi yanal duvarlara olan yakınlık arttıkça hidrodinamik kuvvetler ve yalpa momentinin artış gösterdiği ancak savrulma momentinin azaldığı belirtilmiştir.



Şekil 16. Kuvvet ve momentlerin yanal duvara olan uzaklığa göre değişimi (Poojari ve Kar, 2016).

Bir başka çalışmada ise Panama kanalındaki bir geminin manevra performansı farklı hızlarda, su derinliklerinde ve duvar kombinasyonlarında tekrarlanarak her bir senaryoda hidrodinamik kuvvetlerin değişimi incelenmiştir (Wang ve Zou, 2015). Bu çalışmada da simülasyonlar düşük hızlarda

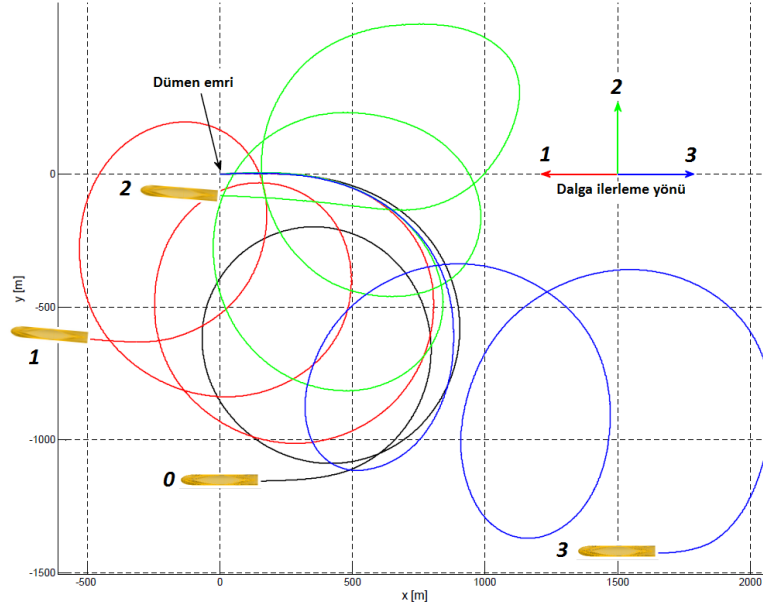
gerçekleştirildiğinden dolayı serbest yüzey etkilerinin ihmal edildiği belirtilmiştir. Çalışmanın sonucu olarak gemi hızının ve su derinliğinin hidrodinamik kuvvetler ve moment üzerinde önemli etkisinin olduğu, daha önce yapılmış olan çalışmalardan da bilindiği üzere hızdaki artışın ve su derinliğindeki azalmanın kuvvet ve moment değerlerini arttırdığını belirtmişlerdir.

Hidrodinamik kuvvetler ve momentin yanı sıra manevra türevlerinin de yatay ve dikey kısıtlamalardan nasıl etkilendiğini incelemek amacıyla Liu H. vd. (2016) KVLCC2 referans modelini kullanarak detaylı bir çalışma yapmıştır. Çalışmada ilk olarak herhangi bir yatay ya da dikey kısıtlama olmadan lineer manevra türevleri viskoz HAD yöntemiyle hesaplanmış ve sonuçlardaki bağıl hatanın maksimum %40 olduğu belirtilmiştir. Daha sonra derin su koşulunda farklı yanal kısıtlama oranları için (b/L) dümene ait manevra türevleri (Y_{δ}, N_{δ}) hesaplanmıştır. Sonuçların farklı b/L oranlarında pek fazla değişmediği gözlenmiştir. İvmeye bağlı türevler ($Y'_{\delta}, Y'_{r}, N'_{\delta}, N'_{r}$) incelendiğinde derin su koşulunda yapılan incelemelerde Y'_{δ} ve N'_{r} değerlerinin b/L oranı arttıkça azaldıkları, N'_{δ} değerinde bu durumun tam tersi bir davranış gözlenmiştir. Y'_{r} değerinde ise düzensiz bir değişim olduğu ve bu duruma sebep olarak da Y'_{r} değeri çok küçük bir değer (10^{-3} mertebelerinde) olduğu için sayısal modelleme ve türbülans yaklaşımlarından gelen hatalardan etkilenmiş olabileceği belirtilmiştir. Hıza bağlı türevlerde (Y_v, N_v, Y_r, N_r) ise hıza bağlı yanal kuvvet türevlerinin (Y_v, Y_r), b/L oranı arttıkça arttığı, hıza bağlı savrulma momenti türevlerinin b/L oranı arttıkça azaldığı belirtilmiştir. Çalışmada son olarak sabit bir yanal kısıtlama oranında (b/L=0.35), dikey kısıtlama mesafesi (h/T) değiştirilerek hız ve ivme türevlerindeki değişim incelenmiştir. Su sığlaştıkça ivmeye bağlı kuvvet ve moment türevlerinin tamamında artış görüldüğü, yanal hıza bağlı türevlerin ise (Y_v, N_v) derinlik arttıkça azaldığı, açılma hıza bağlı türevlerin (Y_r, N_r) ise derinlikle beraber artış gösterdiği sonucuna varılmıştır.

3.6. Dalga etkisi

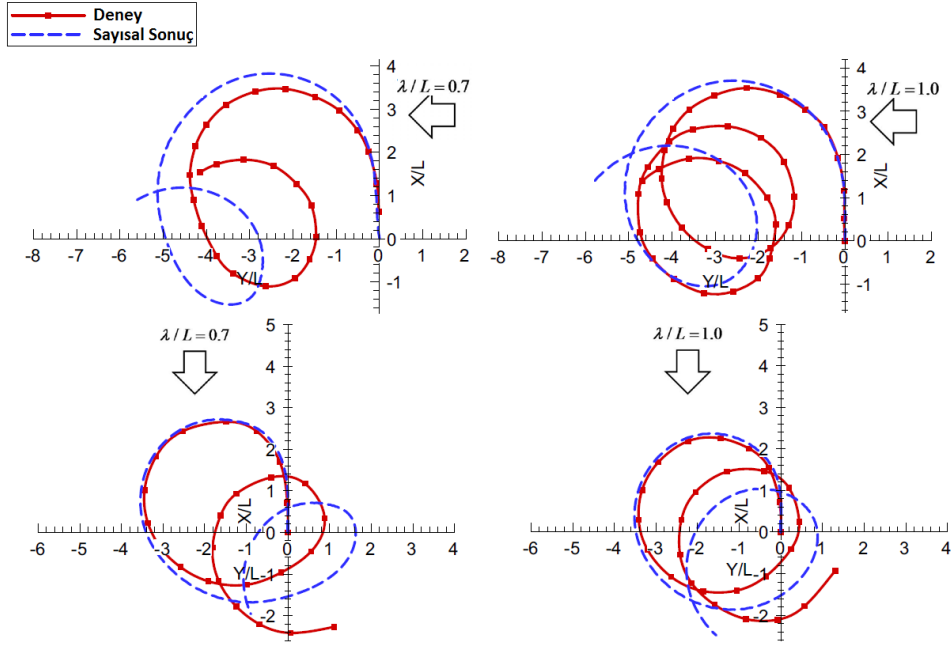
Dalgalı denizlerde manevra kabiliyeti özellikle açık denizde yol alan gemilerin seyir güvenliği için hayati öneme sahiptir. Son yıllarda gemilerin dalgalı denizlerdeki manevra performansları ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Ayrıca bu konuda SHOPERA isimli uluslararası bir proje yürütülmektedir. Proje kapsamında DTC ($\lambda=1:63.65$) ve KVLCC2 ($\lambda =1:80$) referans gemi modellerinin düzenli ve düzensiz dalgalarda dönme ve zigzag manevraları gerçekleştirilerek performansları incelenmiştir. Gemilere etkileyen ek direnç de incelenen diğer konular arasında olmuştur. Bu proje kapsamında yapılmış olan çalışmalardan elde edilen sonuçlar Liu S. vd. (2016)'ın çalışmasında bulunabilir. Dalgalı sudaki ek direncin incelendiği diğer bir deneysel çalışmada Yasukawa ve Adnan (2006), S-175 isimli referans gemi modeli ile düzenli dalgalarda statik sürüklenme deneyini gerçekleştirerek ek direnç, yanal kuvvet ve savrulma momentini ölçmüşlerdir. Bu çalışmada tekne üzerine etkileyen yanal kuvvet ve savrulma momentinin dalga kaynaklı oluşan ek dirence nazaran çok büyük olduğunu belirtmişlerdir. Xu vd. (2007) ise dalgalı suda bir dizi DHM testi gerçekleştirerek gemi modeli üzerine etkileyen hidrodinamik kuvvetleri incelemişlerdir. Çalışmanın bir sonucu olarak düşük hızlarda seyreden gemilerin dalgalı sudaki manevra kabiliyetlerinin en çok düşük frekanslı lineer olmayan dalga kuvvetlerinden etkilendiğini söylemişlerdir. Bir başka deneysel çalışmada Lee vd. (2009), KVLCC serisinden bir modeli kullanarak gemiye farklı dalga boyu ve genliklerde dalgalar gönderip düzenli dalgalarda manevra performans tahmini yapmıştır. Sonuç olarak dalga etkisinin dalganın geliş yönü ve genliğine bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. Bunun yanı sıra ikinci mertebeden dalga kuvvetlerinin dönme ve zigzag testlerinde geminin yörüngesi üzerinde önemli etkisinin olduğunu belirtmiştir. Benzer bir çalışmada Sprenger vd. (2016), Şekil 17'de görüldüğü gibi tam ölçekli DTC referans gemisinin düzenli dalgalarda

dönme manevrası sonuçlarını paylaşmışlardır. Burada elde edilen sonuçlardan da geminin izlediği yörüngenin dalganın geliş yönü doğrultusunda değiştiği sonucu çıkarılmaktadır. Ayrıca çalışmanın bir başka sonucu olarak da dalga kaynaklı ek direncin su derinliğiyle doğru orantılı olarak arttığını belirtmişlerdir.



Şekil 17. Düzenli dalgalarda ($H=2.0$ m, $T=10.6$ s) farklı yönlerden (0: durgun su; 1: önden; 2: bordadan; 3: arkadan) gelen dalgaların dönme yörüngesine olan etkisi (Sprenger vd., 2016).

Deneyel yöntemler günümüzde hala güvenilirlik açısından ilk sırada yer alsada da araştırmacılar sayısal yöntemleri kullanarak da dalgalı su durumu için sonuçlar elde edebilmektedir. Viskoz olmayan yöntemler son yıllarda gemilerin manevra performansının incelenmesinde sıklıkla kullanılmıştır. Örneğin, S-175 ve Seri-60 referans modellerini kullanan Seo ve Kim (2011), Rankine panel yöntemini kullanarak zig-zag ve dönme testlerini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada 4SD'ye sahip bir denizcilik kodunu manevra kodu ile entegre bir şekilde kullanarak önce tekne üzerine etkiyen kuvvetleri hesaplayıp daha sonra teknenin konumunu belirlemişlerdir. Şekil 18'de gösterildiği üzere dalganın boyu ve geliş yönüne (baştan ve bordadan) bağlı olarak elde edilmiş olan dönme manevrası sonuçları deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Dönme manevrasında, ikinci mertebeden sürüklenme kuvvetlerinin önemli rol oynadığı söylenmiş ve bu yüzden dönme manevrası boyunca dalganın ilerleyişi yönünde bir sürüklenme hareketinin olduğunu belirtmişlerdir. Manevra ve denizcilik teorilerinin birlikte kullanıldığı benzer bir çalışmada S-175 referans gemisinin farklı yönlerden gelen (baştan ve bordadan) ve farklı dalga boylarına ($\lambda/L=0.5,0.7,1.0,1.4$) sahip düzenli dalgadaki manevra performansı incelenmiştir (Gu vd., 2015). Dönme manevrasını elde edebilmek için MMG matematik modeli, hidrodinamik kuvvetler ve momentin hesaplanması için de Rankine panel yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle elde edilen sonuçların deney sonuçlarıyla uyumlu olduğu belirtilmiştir. Dalgaların manevra performansına etkisi sadece düzenli dalgalarda değil, düzensiz dalgaların olduğu durumlar için de incelenmiştir (Skejic ve Faltinsen, 2013; Yasukawa vd., 2015).



Şekil 18. Dalga geliş açısı ve dalga boyuna bağlı olarak düzenli dalgalarda dönme yörüngesinin hesaplanması ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılması (Seo ve Kim, 2011).

Bazı araştırmacılar da dalgalı suda manevra performansını incelemek için viskoz HAD yöntemini kullanmışlardır. Sadat-Hosseini vd. (2014) tam ölçekte çift pervaneli ve tam takıntılı bir geminin dönme manevrasını RANS ve DES modellerini kullanarak doğrudan modellemişlerdir. HAD ve deney sonuçları, kuvvetler ve momentin yanısıra tekne üzerindeki hidrodinamik basınç ve dalga deformasyonu açısından da karşılaştırılmıştır. DES yaklaşımının RANS'a göre hem kuvvet ve moment değerleri hem de akış alanına ait özellikler açısından gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Ancak daha önce de belirtildiği gibi DES yaklaşımında herhangi bir türbülans modeli kullanılmadığı için simülasyonlarda çok fazla sayıda ağ elemanı kullanılmakta ve yüksek bilgisayar gücü gerekmektedir. Visköz HAD yönteminin kullanıldığı başka bir çalışmada ise Uharek ve Cura-Hochbaum (2015) düzenli dalgalarda ilerleyen bir gemi için farklı dalga boyu ve geliş açılarında hesaplamalar yapmışlardır. HAD yöntemi ile hesaplanan kuvvet ve moment sonuçlarını kullanarak yeni bir matematik model üretmişlerdir. Kuvvetler ve momenti hesaplayan bu model sadece dalga boyunu ve geliş açısını baz alarak Fourier serisi açılımı ile oluşturulmuştur. Türetilen matematik model ve viskoz HAD yöntemi sonuçları arasında kuvvetler için ortalama %6, moment için ise %7'lik bir fark olduğu belirtilmiştir. Ancak matematik modelde yer alan hidrodinamik katsayılar hesaplanırken ilk başta belirlenen dalga boyu aralığının dışında bir dalga boyu değeri kullanıldığında matematik modelin doğru sonuçlar vermeyeceği belirtilmiştir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada IMO'nun gemiler için belirlemiş olduğu manevra performans kriterleri gösterilerek bu kriterlerin geminin yapacağı manevralar için ne anlama geldiğinden ve yine IMO'nun önermiş olduğu standart manevra testlerinin nasıl yorumlanması gerektiğinden bahsedilmiştir. Bu konuda iteratürde yer alan bazı önemli çalışmalar da referans alınarak genel bir değerlendirme yapılmıştır. Ayrıca gemilerin manevra kabiliyetlerini önemli ölçüde etkileyen bazı iç ve dış etkiler literatürde bu konularla

ilgili yapılmış çalışmalar referans gösterilerek anlatılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen çıkarımlar kısaca şu şekilde özetlenebilir:

- Şu an itibarıyla IMO'nun açık denizde yüzen gemilerle ilgili kapsamlı bir dökümanı bulunmaktadır. Sığ ve kısıtlanmış sularda seyreden gemiler için ise farklı uluslararası komisyonlar tarafından sadece Avrupa'da Rhine nehri ve Çin'de Yangtze nehri gibi belirli sığ su bölgeleri baz alınarak bir takım kriterler önerilmiştir. Ancak hala IMO tarafından tüm gemi tiplerini ve farklı çevre şartlarını (ör: dalgalı su, sığ su, vb.) kapsayacak daha kapsamlı bir döküman hazırlanmasına ihtiyaç duyulmaktadır.
- Zigzag testinden elde edilen aşırı dönme açısı (overshoot angle), başlangıç dönme süresi, dönme kontrol süresi gibi parametrelerin bilinmesi özellikle dar kanallarda çalışan gemiler için çok önemlidir. Çünkü yatay olarak sınırlandırılmış sularda gemiyi sevk eden kişi dümeni bir taraftan diğer tarafa kırdığı zaman geminin ne kadarlık bir aşırı dönme açısı ve sürede döneceğini önceden bilerek yapacağı manevrayı en uygun şekilde gerçekleştirebilir. Gemilerde hızın artmasıyla birlikte ardışık dümen kırmalar arasındaki süre azalmakta, buna karşılık aşırı dönme açısı artmaktadır. Denizaltılarda ise zigzag deneyi hem yatay hem de düşey düzlemlerde gerçekleştirilmektedir. Denizaltıların gerektiğinde kısıtlanmış sularda da bazı operasyonlar gerçekleştirmek zorunda kalabilecekleri için düşey zigzag deneylerinin operasyonel anlamda denizaltılar için daha önemli olduğu söylenmiştir.
- Gemilerde doğrusal rota stabilitesi ile dönme kabiliyeti arasında belirli bir dereceye kadar ters orantı söz konusudur. Genellikle rota tutma kabiliyeti güçlü olan gemilerin dümen dinleme becerileri düşüktür. Buna karşılık dönme kabiliyeti yüksek olan gemilerin de doğrusal bir rotada dengeli olarak kalabilmeleri için sürekli dümen müdahalesinde bulunmak gerekir. Genellikle sabit doğrusal rotalarda uzun mesafeler kateden açık deniz gemilerinde iyi derecede rota tutma kabiliyeti ve dinamik stabilite aranır. Çünkü bu tip gemiler rotalarından saptıkça gemiye etkiyen direnç artar ve bu da yakıt sarfiyatının artmasına sebep olur. Gemi ağırlık merkezinin mastoriden kıça doğru olması, gemi kıç formunun dolgun olması ve kıç tarafta skeglerin bulunması gibi özellikler rota tutma kabiliyetini; dümen alanının yeterince büyük olması, dümen konumunun ve formunun optimum olması, gemi kıç formunun narin olması, gemide taşınması mümkün olan tüm ağırlıkların mastoriye yakın bir yerde toplanarak kütle atalet momentinin azaltılması, blok katsayısının yüksek olması ve B/L oranının artması gibi hususlar geminin dönme manevra kabiliyetini arttırır.
- İyi manevra yapabilen ve aynı zamanda iyi rota tutma kabiliyetine sahip bir gemi dizaynı yapmak da mümkündür. Geminin kıç tarafında yeri optimum olarak belirlenmiş ve alanı da yeterince büyük olarak tasarlanmış bir dümen geminin dönme manevra kabiliyetini arttırdığı gibi doğrusal rota stabilitesini de düzenler. Ayrıca boyu uzun ve genişliği az olan narin formdaki gemilerde T/L oranının artması dönme manevrası performansına herhangi bir olumsuz etki yapmaksızın rota tutma kabiliyetini arttırır.
- Gemilerde tek veya çift pervane kullanımının manevra performansı üzerinde birbirlerine göre hem avantaj hem de dezavantajlarının olduğu görülmüştür. Çift pervaneye sahip gemilerin tek pervanelilere göre dönme yeteneğinin daha kötü fakat rota tutma ve rota değiştirme

kabiliyetlerinin daha iyi olduğunu belirtilmiştir. Bunun yanı sıra kullanılan farklı dümen profillerinin de geminin özellikle dönme manevrasını büyük oranda etkilediği sonucuna varılmıştır. Özellikle balık kuyruğu (fishtail) dümen profilinin dönme manevrası performansını arttırdığı, bükümlü (twisted) dümen profilinin ise dönme kabiliyetini çok fazla etkilemediği söylenmiştir. Ayrıca dümene yüzey normali yönünde etkiyen kuvvet arttıkça, dönme manevrasında ilerleme ve taktik çapın, 10/10 ve 20/20 zigzag testinde ise aşırı sapma açılarının azaldığı belirtilmiştir.

- Gemi formu ve ana boyutlarının manevra performansına etkisi ile ilgili yapılmış çalışmalarda, gemi boyunun azalmasının zigzag manevrasını olumsuz etkilediği, su çekimindeki değişimin tek başına önemli bir etkisinin olmadığı, su altı hacim merkezinin (LCB) geminin başına doğru ilerledikçe dönme manevrasını olumlu etkilediği, gemi genişliğinin artmasıyla birlikte boyun küçülmesinin taktik çapı azalttığı fakat aşırı sapma açısını arttırdığı ve dümen alanının büyümesinin manevra kabiliyetini arttırdığı belirtilmiştir. Ancak dümen alanının artması diğer yandan geminin ihtiyacı olan gerekli gücün artmasına da sebep olmaktadır. Manevra performansı açısından genellikle uzun ve narin formların (düşük blok katsayısı) rota tutma kabiliyeti geniş ve dolgun gemilere göre daha iyi olmaktadır. Fakat dönme performansı için bu durumun tam tersi geçerlidir. Bunun haricinde geminin trimli olması da manevra performansını etkilemektedir. Örneğin gemi başa trimli ise doğrusal rota stabilitesi azalmakta fakat buna karşılık dönme performansı artmakta, eğer kıça trimli ise bu durumun tam tersi olmaktadır.
- Manevra çalışmalarında şu ana kadar ölçek etkisinden tamamen kurtulabilmek için önerilmiş herhangi bir yöntem veya prosedür bulunmamaktadır. Ölçek etkisinin küçük açılarda ileri öteleme kuvveti (X) üzerinde önemli etkisinin olduğu ancak yanal kuvvet (Y) ve savrulma momenti (N) üzerinde çok ciddi bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Bu da X'e bağlı manevra türevlerinin ölçek küçüldükçe ciddi oranda değiştiğini göstermektedir. Ancak sürüklenme açısı (β) arttıkça Y kuvveti üzerindeki ölçek etkisi, X kuvveti ve N momentine nazaran daha fazla arttığı söylenmiştir. Ayrıca açısız hıza bağlı lineer manevra türevlerinin de (Y_r, N_r) yanal hıza bağlı lineer türevlere (Y_v, N_v) göre daha fazla ölçek etkisine maruz kaldığı belirtilmiştir.
- Sığ suyun manevra performansına etkisi en genel haliyle özetlenecek olursa, su sığlaştıkça tekneye etkiyen hidrodinamik kuvvetler ve savrulma momentinde artış olmaktadır. Buna bağlı olarak da geminin rota tutma kabiliyeti artarken dönme kabiliyeti azalmaktadır. Ayrıca tekne ve pervaneye ait türevlerin (Y_v, N_v, Y_n, N_n) dümen türevlerine (Y_δ, N_δ) göre su derinliği değişiminden daha fazla etkilendiğini belirtilmiştir. HAD yöntemi ile gerçekleştirilen sığ su simülasyonlarında ise direnç sonuçlarındaki doğruluğu arttırabilmek için kontrol hacminin oldukça geniş tutulması tavsiye edilmiştir. Çünkü yan duvarların yanal kuvvet ve savrulma momenti üzerindeki etkisiyle sonuçların yaklaşık %10 kadar değiştiği belirtilmiştir. Serbest yüzey etkilerinin ihmal edilmesinin hidrodinamik kuvvetlerin deney sonuçlarına kıyasla yaklaşık %5 oranında daha düşük tahmin edilmesine yol açtığı söylenmiştir. HAD simülasyonları modellenirken gemi batma ve trim hareketlerine serbest bırakılmazsa (OSD), çok düşük hızlarda ($Fr < 0.2$) bu durumun kuvvet ve moment sonuçlarını çok fazla etkilemediği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, derin su koşuluna kıyasla sığ suda ileri öteleme kuvvetinin yaklaşık iki kat, yanal öteleme kuvvetinin altı kat ve savrulma momentinin de dört kata kadar arttığı belirtilmiştir.

- Yatay ve düşey kısıtlamaların manevra performansına etkisinin incelendiği çalışmalarda gemiye kanal duvarlarından kaynaklanan yansıma etkileri, farklı yanal ve düşey kısıtlama oranlarına göre (b/L ve h/T) hidrodinamik özelliklerin ve manevra türevlerinin ne ölçüde değiştiği incelenmiştir. Gemilerin dar kanallarda yol alırken duvarlara yakın dönüşlerde pervane devrini yüksek tutmaması, küçük dümen açılarıyla kanal ortasından gitmeleri gerektiği tavsiye edilmiştir. Aksi takdirde pervanenin akımı hızlandırmasından dolayı geminin kıç bölgesi ile duvar arasında bir emme basıncı oluşacağı ve geminin kanal duvarına çarpma tehlikesi ile karşı karşıya kalabileceği belirtilmiştir.
- Dalgaların manevra performansına etkisi de son yıllarda en çok irdelenen konulardan birisi olmuştur. SIMMAN 2019 çalıştayının ana konusu da gemilerin dalgalı sudaki manevra performansı olarak belirlenmiştir. Özellikle son yıllarda manevra ve denizcilik teorileri entegre bir şekilde kullanılarak düzenli dalgalarda manevra performansı viskoz olmayan yöntemlerle de incelendiği görülmüştür. Ancak düzensiz dalgalarda yapılmış olan az sayıda çalışma bulunmaktadır. Literatürde dalga etkisi ile ilgili olan çalışmaların birçoğunda genellikle düzenli dalgalarda dalga boyunun, genliğinin ve geliş yönünün dönme ve zigzag rotaları üzerinde olan etkileri araştırılmıştır.

Kaynakça

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

Babu, M.N.P. ve Krishnankutty, P. (2015). Numerical Study on Fish Tail Shaped Rudder for Improved Ship Maneuvering. Proceedings of the ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2015, St. John's, Newfoundland, Canada.

Bal, S. (2011). Hydrodynamic Analysis of 2D Hydrofoils with Fish Tail. Symposium on Future Technology, The Turkish Chamber of Mechanical Engineers, Istanbul, 20-21 October 2011, pp:23-26, in Turkish.

Daidola, J. C., Lundy, W., Barr, R. (2002). Evolution of the IMO standards for maneuverability. SNAME Trans. 110, pp. 395–411.

Deng, G., Leroyer, A., Guilmineau, E., Queutey, P., Visonneau, M. ve Wackers, J. (2016). CFD Simulation of PMM Motion in Shallow Water for the DTC Container Ship. MASHCON 2016, Ham-burg, Germany, pp. 93–98.

Eloot, K., Vantorre, M. (2011). Ship behaviour in shallow and confined water: an overview of hydrodynamic effects through EFD. In: RTO-AVT Specialists' meeting on Assessment of Stability and Control Prediction Methods for Air and Sea Vehicles. NATO. Research and Technology Organisation (RTO), Ports-down, UK (October).

Furukawa, Y., Nakiri, Y., Kijima, K. (2011). Prediction of Linear Hydrodynamic Derivatives in Shallow Water. 2nd International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water, Trondheim, Norway, pp. 147-152.

Gu, X., Ma, N., Xu, J. and Zhu, D. (2015). A Simplified Simulation Model for a Ship Steering in Regular Waves. STAB 2015, Glasgow, UK, pp. 613–621.

- 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.
- International Maritime Organization. (2002a). Explanatory Notes to the Standards for Ship Manoeuvrability [December].
- International Maritime Organization. (2002b). Standards for Ship Manoeuvrability [December].
- 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.
- Jin, Y., Duffy, J., Chai, S., Chin, C. ve Bose, N. (2016). URANS study of scale effects on hydrodynamic manoeuvring coefficients of KVLCC2. *Ocean Engineering*, 118, pp. 93–106.
- Kim, K. H., Gorski, J., Miller, R., Wilson, R., Stern, F., Hyman, M. ve Burg., C. (2003). Simulation of surface ship dynamics. Proceedings of the 2003 User Group Conference.
- Kim, Y. G., Kim, S.Y., Kim, H.T., Lee, S.W., Yu, B.S. (2007). Prediction of the maneuverability of a large container ship with twin propeller and twin rudders. *J. Mar. Sci. Technol.* 12[3], 130–138.
- Koh, K. K., Yasukawa, H. (2012). Comparison study of a pusher barge system in shallow water, medium shallow water and deep water conditions. *Ocean Eng.* 46, 9–17.
- Koh, K. K., Yasukawa, H., Hirata, N. (2008a). Hydrodynamic derivatives investigation of unconventionally arranged pusher-barge systems. *J. Mar. Sci. Technol.* 13[3], 256–268.
- Koh, K. K., Yasukawa, H., Hirata, N. (2008b). Shallow water effect on turning motion of a pusher-barge system. In: *The 4th Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics*, vol.3. Taipei, pp. 16–18 [June].
- Koh, K. K., Yasukawa, H., Hirata, N., Kose, K. (2008c). Maneuvering simulations of pusher-barge systems. *J. Mar. Sci. Technol.* [Jpn.] 13[2], 117–126.
- Koop, A. (2015). Shallow Water Current Loads on a LNG Carrier Using CFD. OMAE 2015, St. John's, Newfoundland, Canada, 12 pp.
- Lataire, E. (2014). Experiment Based Mathematical Modelling of Ship-Bank Interaction. Ghent University, Belgium.
- Lee, S. K., Hwang, S. H., Yun, S. W., Rhee, K.P. ve Seong, W.J. (2009). An Experimental Study of a Ship Manoeuvrability in Regular Waves. Proceedings of MARSIM 2009, Panama.
- Leeuwen, G. V. ve Journee, J. M. J. (1970). Prediction of Ship Manoeuvrability Making Use of Model Tests, Report 288, April 1970, Delft University of Technology, Ship Hydromechanics Laboratory, Mekelweg 2, 2628 CD Delft, The Netherlands.

- Liu, H., Ma, N. ve Gu, X. C. (2016). Numerical Prediction of Ship Hydrodynamic Derivatives in Close Proximity to a Vertical Bank and Maneuvering Stability Analysis. OMAE 2016, Busan, Korea, pp. 1–10.
- Liu, J., Quadvlieg, F. ve Hekkenberg, R. (2016). Impacts of the rudder profile on manoeuvring performance of ships. *Ocean Engineering*, 124, pp. 226–240.
- Liu, S., Papanikolaou, A., Potthoff, R., El Moctar, O. ve Shigunov, V. (2016). SHOPERA Deliverable D4.3. Benchmarking of Numerical Tools, pp. 69.
- Luo, W., Zhang, P. (2007). Evaluating the maneuverability of a new type of self-propelled barge. *J. Mar. Sci. Appl.* 6[4], 44–47.
- Maimun, A., Priyanto, A., Muhammad, A.H., Scully, C.C., Awal, Z.I. (2011). Manoeuvring prediction of pusher barge in deep and shallow water. *Ocean Eng.* 38 [11– 12], 1291–1299.
- Mascio, A.D., Dubbioso, G., Notaro, C. ve Viviani, M. (2011). Investigation of Twin-Screw Naval Ships Maneuverability Behavior. *Journal of Ship Research*, Vol. 55, No. 4, pp. 1–28.
- 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.
- Nomoto, K. (1966). Response Analysis of Manoeuvrability and its Application to Ship Design. 60th Anniversary Series, JSNA.
- Pérez, F.L., Clemente, J.A. (2007). The influence of some ship parameters on manoeuvrability studied at the design stage. *Ocean Engineering*, Vol. 34, pp. 518–525.
- Poojari, D. B. and Kar, A. R. (2016). Effect of Lateral and Depth Restriction on Ship Behavior Using Computational Fluid Dynamics. MASHCON 2016, Hamburg, Germany, pp. 9–15.
- Quadvlieg, F., Armaoglu, E., Eggers, R. ve van Coevorden, P. (2010). Prediction and Verification of the Maneuverability of Naval Surface Ships. SNAME 2010, Bellevue, USA.
- Rotteveel, E. (2013). Investigation of Inland Ship Resistance, Propulsion and Manoeuvring Using Literature Study and Potential Flow Calculations [Master's thesis], Delft University of Technology [September].
- Sabuncu, T. (1985). Gemi Manevraları ve Kontrolü, İ.T.Ü Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi Ofset Baskı Atölyesi, İstanbul.
- Sadat-Hosseini, S., Kim, D. H., Taylor, G. L., Fu, T., Terril, E. ve Stern, F. (2014). Vortical Structures and Instability Analysis for Athena in Turning Maneuver with Full-Scale Validation. 30th Symposium on Naval Hydrodynamics, Hobart, Australia, 23 pp.
- Sasaki, N., Atlar, M. ve Kuribayshi, S. (2016). Advantages of twin rudder system with asymmetric wing section aside a propeller. *Journal of Marine Science and Technology*, 21:297-308, DOI: 10.1007/s00773-015-0352-z.
- Sano, M., Yasukawa, H. ve Hata, H. (2014). Directional Stability of a Ship in Close Proximity to Channel Wall. *Journal of Marine Science and Technology*, pp. 376–393.
- Seo M.G. ve Kim Y. (2011). Effects of Ship Motion on Ship Maneuvering in Waves. Proc. of 26th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, April 2011, Athens, Greece.
- Shen, Y., Rhee, B., Miller, R., ve Gorski, J. (2010). Scale Effects on Rudder Effectiveness in a Turning Maneuver. 28th Symposium on Naval Hydrodynamics, Pasadena, 12-17 September 2010.

Skejic, R. ve Faltinsen, O. M. (2013). Manoeuvring Behavior of Ships in Irregular Waves. Proceedings of the ASME 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2013, June 9 - 14, 2013, Nantes, France.

Society of Naval Architecture and Marine Engineers (SNAME). (1989). Principles of Naval Architecture, Vol III.

Son, N.S., Kim, S.Y., Kim, Y.G., Oh, B.I, Ha, W.H. (2010). Development of additional towing device with a servo motor for free model tests. 10th Asian conference on marine simulation research.

Sprenger, F., Hassani, V., Maron, A., Dele-fortrie, G., Van Zwijnsvoorde, T., Cura-Hochbaum, A. ve Lengwinat, A. (2016). Establishment of a Validation and Benchmark Database for the Assessment of Ship Operation in Adverse Conditions. OMAE 2016, Busan, Korea, 12 pp.

TMMOB Gemi Mühendisliği El Kitabı. (2011). Gemi Mühendisleri Odası Yayınları, İstanbul.

Toxopeus, S.L., Simonsen, C.D., Guilmineau, E., Visonneau, E., Xing, T., Stern, F. (2013). Investigation of water depth and basin wall effects on KVLCC2 in manoeuvring motion using viscous-flow calculations. Journal of Marine Science and Technology, DOI 10.1007/s00773-013-0221-6.

Uharek, S. ve Cura-Hochbaum, A. (2015). Modelling Mean Forces and Moments due to Waves Based on RANS Simulations. ISOPE 2015, Kona, Big Island, Hawaii, USA, pp. 46–51.

Vantorre, M. (2003). Review of practical methods for assessing shallow and restricted water effects. International Conference on Marine Simulation and Ship Maneuverability [MARSIM '03]. Kanazawa, Japan, pp. WS – 4–1/11 [August].

Van Hoydonck, W., Toxopeus, S., Eloot, K., Bhawsinka, K., Queutey, P. and Visonneau, M. (2015). Bank Effects for KVLCC2. WMTC 15, Providence, Rhode Island, USA, 21 pp.

Wagenaar, W., A. (1970). Human aspects of ship manoeuvring and simulations. International Ship Building Progress, 185(17), pp. 11-14.

Wang, H.Z ve Zou, Z.J. (2015). Numerical Prediction of the Hydrodynamic Forces on a Post-Panamax Vessel in the Third Set of Panama Locks. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2015, 141(1).

Xu, Y., Kinoshita, T, Bao, W. ve Itakura, H. (2007). A PMM Experimental Research on Ship Maneuverability in Waves. Proceeding of OMAE 2007, San Diego, California, USA.

Yang, H., Kwon, C.-S., Lee, Y.-J. ve Park, G.-I. (2009). Prediction of manoeuvrability on the ice-breaking shuttle tanker with twin pods. Proceedings of MARSIM 2009, Panama.

Yang H, Lee J, Kim K. (2015). Numerical and experimental study on the rudder force of a twisted rudder. International Conference on Marine Simulation and Ship Maneuverability (MARSIM '15), Newcastle upon Tyne, UK.

Yasukawa, H. ve Adnan, F.A. (2006). Experimental Study on Wave-induced Motions and Steady Drift Forces of an Obliquely Moving Ship, (in Japanese). Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.3, pp. 133-138.

Yasukawa, H., Hirata, N. ve Kose, K. (2006). Improvement of course-keeping ability of a high speed mono-hull by skegs. Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.3, pp. 125-131.

Yasukawa, H., Hirata, N., Yonemasu, I., Terada, D. ve Matsuda, A. (2015). Maneuvering Simulation of a KVLCC2 Tanker in Irregular Waves. MARSIM 2015, Newcastle, UK, 14 pp.

Yeo, D. J., Yun, K. ve Kim, Y. (2016). Experimental Study on the Manoeuvrability of KVLCC2 in Shallow Water. MASHCON 2016, Hamburg, Germany, pp. 287–294.

Zaojian, Z. (2006). Lecture notes on Ship Maneuvering and Seakeeping. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University.

Zou, L., Larsson, L., Delefortrie, G. ve Lataire, E. (2011). CFD Prediction and Validation of Ship-Bank Interaction in a Canal. 2nd International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water, Trondheim, Norway, pp. 413-422.

Zou, L., Larsson, L., Orych, M. (2010). Verification and validation of CFD predictions for a manoeuvring tanker. Journal of Hydrodynamics, 22(5), pp. 438-445.