



Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013
Investește în oameni!

Proiect InnoRESEARCH - POSDRU/159/1.5/S/132395

Burse doctorale și postdoctorale în sprijinul inovării și competitivității în cercetare



UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCUREȘTI

Facultatea de Energetică

Departamentul Hidraulică, Mașini Hidraulice și Ingineria Mediului

Nr. Decizie Senat 183 din 14.12.2017

TEZĂ DE DOCTORAT

Corelația între parametrii geometrici și funcționali ai unei nave și navigația în canale

Correlation between a ship's geometric and functional parameters and channel navigation

Autor: Ing. Petru Sergiu ȘERBAN

Conducător de doctorat: Prof. emerit dr. ing. Valeriu Nicolae PANAITESCU

COMISIA DE DOCTORAT

Președinte	Prof. dr. ing. Adrian BADEA	de la	Universitatea Politehnica din București
Conducător de doctorat	Prof. emerit dr. ing. Valeriu Nicolae PANAITESCU	de la	Universitatea Politehnica din București
Referent	Prof. dr. ing. Beazit ALI	de la	Academia Navală "Mircea cel Bătrân" din Constanța
Referent	Prof. dr. ing. Viorel ANDREI	de la	Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați
Referent	Prof. dr. ing. Carmen Anca SAFTA	de la	Universitatea Politehnica din București

București

CUPRINS

	Pag.
<i>Cuvinte cheie</i>	3
<i>Lista de abrevieri și notații</i>	3
MULȚUMIRI	4
INTRODUCERE	4
1. ACTUALITATEA ȘI OPORTUNITATEA TEMEI TEZEI DE DOCTORAT	4
2. OBIECTIVELE TEZEI	4
CAPITOLUL 1	
CANALE NAVIGABILE UTILIZATE ÎN TRANSPORTUL MARITIM ȘI STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRIILOR EXPERIMENTALE EFECTUATE ASUPRA SQUATULUI	5
1.1. NAVIGAȚIA PE CANALE	5
1.2. CANALE NAVIGABILE UTILIZATE ÎN TRANSPORTUL MARITIM.....	5
1.2.1. Canalul Dunăre – Marea Neagră	5
1.2.2. Canalul Suez	5
1.2.3. Canalul Panama	5
1.2.4. Canalul Kiel	6
1.2.5. Canalul Corint	6
1.3. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRIILOR EXPERIMENTALE EFECTUATE ASUPRA SQUATULUI NAVELOR MARITIME	6
1.3.1. Tipuri de modele testate	6
1.3.2. Metode de măsurare, criterii de similitudine	6
1.3.3. Bazine de carene	7
CAPITOLUL 2	
CONSIDERAȚII TEORETICE ȘI STUDII DE CAZ PRIVIND SQUATUL NAVELOR MARITIME	7
2.1. SQUATUL NAVAL	7
2.2. FACTORII DETERMINANȚI AI SQUATULUI	8
2.2.1. Caracteristicile navei	8
2.2.2. Configurația canalelor	8
2.2.3. Combinația între caracteristicile navei și ale canalului	8
2.2.4. Lățimea de influență	9
2.2.5. Adâncimea de influență	9
2.2.6. Efectele adâncimii limitate și a navigației pe canale asupra rezistenței la înaintare a navei	9
2.3. CALCULUL SQUATULUI MAXIM	9
2.4. RELAȚII EMPIRICE ALE SQUATULUI	10
2.5. SQUATUL NAVELOR ȘI ÎNCLINAREA LONGITUDINALĂ	11
2.6. STUDIU DE CAZ ASUPRA SQUATULUI ÎN CANALUL SULINA UTILIZÂND SIMULATORUL DE NAVIGAȚIE NTPRO 5000	11
2.6.1. Testele simulate	11
2.6.2. Interpretarea rezultatelor	12
CAPITOLUL 3	
ANALIZA SQUATULUI ȘI A REZERVEI DE APĂ SUB CHILĂ PENTRU DIFERITE TIPURI DE NAVE	13
3.1. CALCULUL SQUATULUI ȘI AL REZERVEI DE APĂ SUB CHILĂ	13
3.2. CALCULUL SQUATULUI PENTRU O NAVĂ TIP GENERAL CARGO ÎN DIFERITE CANALE DE SECȚIUNE TRAPEZOIDALĂ	15
3.2.1. Proiectarea navei în programul Autoship	15
3.2.2. Calculul squatului navei tip general cargo	16
CAPITOLUL 4	
STUDIUL INTERACȚIUNII NAVĂ – NAVĂ ȘI NAVĂ – MAL ÎN CANALE	17
4.1. INTERACȚIUNEA NAVELOR. CAUZE ȘI EFECTE	17
4.1.1. Domeniul de presiuni hidrodinamice al navelor	17

4.1.2.	Interacțiunea navă – fund în canale	18
4.1.3.	Interacțiunea navă – navă în canale	18
4.1.3.1.	<i>Întâlnirea navelor într-un canal</i>	18
4.1.3.2.	<i>Depășirea navelor într-un canal</i>	18
4.1.3.3.	<i>Interacțiunea navă – remorcher într-un canal</i>	18
4.1.3.4.	<i>Interacțiunea navă – navă acostată într-un canal</i>	19
4.1.4.	Interacțiunea navă – mal în canale	19
4.2.	STUDIUL DE CAZ PRIVIND INTERACȚIUNEA NAVĂ – NAVĂ UTILIZÂND SIMULATORUL DE NAVIGAȚIE NTPRO 5000	19
4.2.1.	Condițiile inițiale ale situației simulate	19
4.2.2.	Rezultate obținute	20
4.3.	STUDIUL DE CAZ PRIVIND INTERACȚIUNEA NAVĂ – MAL ÎN CANALE UTILIZÂND SIMULATORUL DE NAVIGAȚIE NTPRO 5000	21
4.3.1.	Condițiile inițiale ale situațiilor simulate	21
4.3.2.	Rezultate și discuții	21
CAPITOLUL 5		
	CERCETĂRI EXPERIMENTALE LA BORDUL NAVEI ȘCOALĂ "MIRCEA"	22
5.1.	NAVA ȘCOALĂ "MIRCEA". CARACTERISTICI TEHNICE	22
5.2.	CERCETĂRI EXPERIMENTALE LA BORDUL NAVEI ȘCOALĂ "MIRCEA"	23
5.2.1.	Marșul de instrucție al navei școală "MIRCEA" – 2015	23
5.2.2.	Descrierea metodelor de măsurare	23
5.2.3.	Prelucrarea datelor obținute	24
5.3.	REZULTATE OBȚINUTE	24
5.3.1.	Portul Civitavecchia, Italia	24
5.3.2.	Portul Barcelona, Spania	24
5.3.3.	Portul Marsilia, Franța	25
5.3.4.	Portul Bar, Muntenegru	25
5.4.	CONCLUZII	25
CAPITOLUL 6		
	SIMULAREA NUMERICĂ A EFECTELOR ADÂNCIMII LIMITATE ASUPRA CORPULUI NAVEI ȘCOALĂ "MIRCEA"	26
6.1.	INTRODUCERE	26
6.2.	GEOMETRIA CORPULUI	26
6.3.	GENERAREA REȚELEI DE NODURI	28
6.3.1.	Studiu privind sensibilitatea rețelei de noduri	28
6.4.	MODELUL MATEMATIC	29
6.4.1.	Ecuațiile de guvernare ale modelului matematic	29
6.4.2.	Ecuațiile Navier-Stokes pentru conservarea momentului	29
6.4.3.	Conceptul de modelare a turbulențelor	29
6.4.4.	Modelul de turbulență $k-\omega$	29
6.4.5.	Stratul limită	29
6.4.6.	Criteriul de convergență	30
6.5.	CONDIȚIILE LA LIMITĂ	30
6.6.	REZOLVAREA ȘI REZULTATELE SIMULĂRILOR	31
6.6.1.	Rezolvarea modelului	31
6.6.2.	Rezultate numerice	31
6.6.3.	Verificarea și validarea	33
6.7.	CALCULUL SQUATUL PRIN METODA CFD ȘI COMPARAȚIA ACESTUIA CU FORMULELE EMPIRICE	33
CONCLUZII		
C.1.	CONCLUZII GENERALE	36
C.2.	CONTRIBUȚII ORIGINALE	37
C.3.	PERSPECTIVE DE DEZVOLTARE ULTERIOARĂ	38
C.4.	DISEMINAREA REZULTATELOR	38
BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ		
		39

CUVINTE CHEIE

canal, squat, navă, model, carenă, șenal, rezervă de apă sub chilă, bazin de carene, coeficient de finețe bloc, factor de blocaj, interacțiune, efect de banc, adâncime, simulare numerică, model de turbulență, CFD.

LISTA DE ABREVIERI ȘI NOTĂȚII

Simboluri grecești

Simbol	Descriere	Dimensiuni
ε	Disiparea energiei cinetice turbulente	$L^2 T^{-3}$
θ	Unghiul de înclinare al malului canalului	1
ν	Vâscozitatea cinematică	$L^2 T^{-1}$
ρ	Densitatea	ML^{-3}
τ_w	Tensiunea tangențială la perete	$ML^{-1} T^{-2}$
ω	Disiparea specifică energiei cinetice turbulente	T^{-1}
∇	Volumul deplasamentului	L^3

Simboluri romane

Simbol	Descriere	Dimensiuni
A_C	Aria secțiunii șenalului/canalului	L^2
A_N	Aria suprafeței maestre imerse	L^2
b	Lățimea navei	L
B	Lățimea unui canal rectangular la suprafața apei	L
D	Înălțimea de construcție a navei	L
e_{ch}	Distanța de la bordul navei la centrul canalului	L
F_B	Lățimea de influență	L
F_D	Adâncimea de influență	L
F_Z	Forța totală de flotabilitate	MLT^{-2}
h	Adâncimea	L
h_T	Adâncimea șanțului subacvatic dragat	L
k	Energia cinetică de turbulență	$L^2 T^{-2}$
L_{pp}	Lungimea navei între perpendiculare	L
n	Panta peretelui sau malului canalului	1
p	Presiunea	$ML^{-1} T^{-2}$
S_m	Squat mediu	L
S_{max}	Squat maxim	L
S_{pp}	Squat la pupa	L
S_{pv}	Squat la prova	L
T	Pescaj	L
u_*	Viteza de frecare	LT^{-1}
U	Viteza fluidului	LT^{-1}
ukc	Rezerva de apă sub chilă	L
V_K	Viteza navei în noduri	LT^{-1}
V_N	Viteza navei în m/s	LT^{-1}
W_0	Lățimea unui canal trapezoidal la suprafața apei	L
W	Lățimea la fundul canalului	L
W_{eff}	Lățimea efectivă	L
y_{ch}	Distanța dintre planul diametral al navei și malul canalului	L

Numere adimensionale

Simbol	Descriere	Definiție
C_B	Coeficientul de finețe bloc	$C_B = \frac{\nabla}{L \cdot b \cdot T}$
h/T	Raport adimensional de adâncime	*
S	Factorul de blocaj	$S = \frac{A_N}{A_C}$
y^+	Distanța adimensională până la perete	1

MULȚUMIRI

Adresez sincere mulțumiri conducătorului lucrării, domnul *Prof. emerit dr. ing Valeriu Nicolae PANAITESCU*, pentru coordonarea cu înțelepciune și rigoare științifică a cercetărilor. Domnul profesor a reprezentat pentru mine în cei cinci ani un model, oferindu-mi de fiecare dată încurajările și motivația necesare în momentele mai puțin bune. Îi doresc domnului profesor multă sănătate, să își păstreze spiritul tânăr mulți ani de acum încolo și îl asigur de toată recunoștința mea.

De asemenea, aș dori să mulțumesc tuturor membrilor comisiei de doctorat care m-au sprijinit necondiționat în demersul elaborării tezei:

doamnei *Prof. dr. ing. Carmen Anca Safta*, pentru spiritul critic, intransigent și constructiv care a ajutat la dezvoltarea lucrării;

domnului *Prof. dr. ing. Beazit Ali*, pentru sfaturile utile acordate și solitudinea arătată de fiecare dată;

domnului *Prof. dr. ing. Viorel Andrei*, pentru răbdarea cu care a analizat lucrarea de față.

Totodată, aș dori să adresez mulțumiri colectivului Academiei Navale “Mircea cel Bătrân” din Constanța pentru înțelegerea acordată în decursul timpului:

domnului *Comandor conf. dr. ing. Alecu Toma*, persoana care m-a ghidat spre domeniul cercetării și mi-a fost mereu aproape;

domnului *Conf. dr. ing. Marian Ristea*, pentru sfaturile utile acordate și sprijinul în realizarea simulărilor numerice;

domnului *Contra-amiral de flotilă (R) prof. dr. ing. Vergil Chițac*, pentru încrederea acordată și facilitarea participării mele la voiajul de instrucție cu navă școală “MIRCEA”;

domnului *Locotenent comandor conf. dr. ing. Sergiu Lupu*, directorul departamentului din care fac parte, pentru sprijinul în rezolvarea problemelor organizatorice din departament.

Nu aș fi reușit în demersul meu fără ca *familia* să îmi fie aproape. Mulțumesc părinților, tatălui meu *Gheorghe Șerban* și mamei mele *Mioara Șerban* pentru educația, sprijinul material și moral acordat, precum și soției mele *Maria Raluca Șerban*, pentru înțelegerea arătată și suportul acordat în decursul anilor, cu promisiunea că mă voi revanșa pentru toate sacrificiile făcute.

Mii de mulțumiri tuturor celor care m-au sprijinit și pe care, fără intenție, i-am omis.

INTRODUCERE

1. ACTUALITATEA ȘI OPORTUNITATEA TEMEI TEZEI DE DOCTORAT

În ultimul deceniu, s-a observat o creștere continuă a dimensiunilor diferitelor tipuri de nave, în special la tancuri petroliere, port – containere, nave tip RO – RO¹ sau gaziere. Pe de altă parte, dimensiunile canalelor sau ale râurilor navigabile și ale porturilor frecventate de aceste tipuri de nave, de obicei, nu cresc în același ritm. În consecință, comportamentul navelor în aceste zone este influențat, în mare măsură, de condițiile restrictive ale căilor de navigație.

O navă aflată în marș dezlocuiește și accelerează în mod continuu o cantitate semnificativă de apă, care, conform principiului lui *Bernoulli*, duce la o scădere de presiune în jurul navei. Aceasta din urmă produce o deplasare pe verticală caracterizată printr-o afundare a navei la perpendicularele² prova și pupa, sau, alternativ, o afundare medie și o înclinare. Acest fenomen este numit *squat*. Fenomenul este de mare interes pentru evoluția actuală a industriei navale și a științei, fiind dezbătut în cadrul conferințelor internaționale și studiat în diferite universități și institute de specialitate din Uniunea Europeană și din alte state, unde se efectuează cercetări de anvergură asupra perfecționării metodelor de studiu.

2. OBIECTIVELE TEZEI

Luând în considerare necesitatea estimării corecte a fenomenului de squat și actualitatea subiectului, teza de doctorat cu titlul – “*Corelația între parametrii geometrici și funcționali ai unei nave și navigația în canale*” – își propune, inițial, o abordare teoretică a producerii acestui fenomen cu

¹ navă roll on – roll off – tip de navă maritimă specializată pentru transportul vehiculelor rutiere, trailerelor cu containere, vehicule pe șenile, autobuze etc.

² perpendiculară – la prova – perpendiculara pe planul de bază coborâtă din punctul de intersecție al extremității prova cu planul liniei de plutire de plină încărcare; la pupa – perpendiculara pe planul de bază care trece prin axul cârmei

consecințe asupra siguranței navigației în condiții de adâncime limitată, după care se axează pe analize numerice și studii de caz ale squatului pentru diferite tipuri de nave și configurații de canale, iar în final evaluează producerea squatului la bordul navei școală „MIRCEA” prin cercetări experimentale și simulări numerice CFD³.

Plecând de la acest deziderat, se pot defini obiectivele operaționale ale tezei, după cum urmează:

- evaluarea stadiului actual al cercetărilor asupra fenomenului de squat și identificarea celor mai utilizate canale navigabile în transportul maritim;
- studiul teoretic privind fenomenului de squat și al factorilor determinanți, precum și o analiză comprehensivă a relațiilor de calcul existente în literatura de specialitate;
- efectuarea unui studiu prin simulări asupra producerii squatului la nave militare și a pericolului eșuării acestora la tranzitarea Canalului Sulina;
- evaluarea numerică a squatului produs la diferite categorii de nave maritime comerciale la navigația prin două tipuri de canale;
- efectuarea unor studii de caz referitoare la interacțiunea navă – navă și navă – mal în Canalul Suez;
- analiza oportunității producerii squatului la bordul navei școală „MIRCEA” prin cercetări experimentale;
- simularea numerică a parametrilor hidrodinamici ai corpului navei școală „MIRCEA” în domenii de diferite adâncimi utilizând programul software ANSYS;
- evaluarea squatului determinat cu ajutorul metodei CFD prin comparație cu relațiile empirice de calcul existente în literatura de specialitate.

CAPITOLUL 1. CANALE NAVIGABILE UTILIZATE ÎN TRANSPORTUL MARITIM ȘI STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR EXPERIMENTALE EFECTUATE ASUPRA SQUATULUI

1.1. NAVIGAȚIA PE CANALE

Un canal navigabil este o cale îngustă de tranzit care conectează două ape de mărimi semnificativ mai mari. În cele mai întâlnite cazuri se referă la o întindere de apă care se află de-a lungul a două teritorii masive dar, de asemenea se poate face referire și la o cale navigabilă ce se află deja într-o zonă acoperită cu apă, dar nu este navigabilă, care datorită lucrărilor ce îi sunt aduse poate fi transformată într-o cale sigură de navigație.

Navigația prin canale, treceri înguste și în general treceri dificile, presupune anumite activități preliminare ale comandantului și echipajului.

Dacă instrucțiunile de tranzitare nu prevăd altfel, navigația se execută cât mai aproape de malul drept, navele încrucișându-se cu babordul. Nava care ajunge din urmă o altă navă, o depășește prin babord, cu tribordul.

1.2. CANALE NAVIGABILE UTILIZATE ÎN TRANSPORTUL MARITIM

1.2.1. Canalul Dunăre – Marea Neagră

Canalul Dunăre – Marea Neagră este un canal navigabil ce leagă porturile Cernavodă de pe Dunăre și porturile Constanța și Midia de la Marea Neagră, scurtând drumul spre portul Constanța cu aproximativ 400 km. Canalul, cu lungime totală de 95,6 km, este format din ramura principală și ramura de nord, cunoscută sub denumirea de Canalul Poarta Albă – Midia – Năvodari, în lungime de 31,2 km.

1.2.2. Canalul Suez

Canalul Suez aflat la vest de Peninsula Sinai este un canal de 193,3 km lungime și lat de 313 m în cel mai îngust punct, cu o adâncime de 24 m. Având o secțiune trapezoidală, lățimea canalului la adâncimea de 11 m este de 205 – 225 m. Este situat în Egipt, între orașele Port Said (*Būr Sa'īd*) la Marea Mediterană și Suez (*al-Suways*) la Marea Roșie.

1.2.3. Canalul Panama

Canalul Panama traversează istmul Panama din America Centrală, făcând legătura între Golful Panama din cadrul Oceanului Pacific și Marea Caraibelor din Oceanul Atlantic. Canalul a avut un impact

³ Computational Fluid Dynamics

enorm asupra navigației, deoarece navele nu mai trebuie să treacă prin sudul Americii de Sud la Capul Horn, scurtând distanța dintre New York și San Francisco de la 22 500 km la 9500 km. În fiecare an prin canal trec mai mult de 14 000 de nave, transportând mai mult de 20 378 milioane de tone de marfă.

1.2.4. Canalul Kiel

Canalul Kiel (Nord – Ostsee – Kanal) este situat în nordul Germaniei, unind Marea Baltică cu Marea Nordului, scurtând cu 400 km legătura pe apă dintre Hamburg și Kiel. Canalul măsoară 98,7 km lungime, are o lățime maximă de 162 m la suprafața apei și 90 m la fund, cu o adâncime de 11 m.

1.2.5. Canalul Corint

Canalul Corint face legătura între Golful Corint și Golful Saronic din Marea Egee. Acesta trece prin cea mai îngustă porțiune a Istmului Corint și separă Peninsula Pelopones de restul Greciei. Canalul constă într-un singur fir de apă cu adâncimea de 8 m, fără ecluze, fiind escavat la nivelul mării. Are o lungime totală de 6343 m, o lățime de 21,3 m la baza sa și 24,6 m la nivelul mării. Malurile de piatră ale canalului se ridică la o înălțime maximă de 79 m deasupra nivelului mării și sunt aproape verticali. Înălțimea maximă de trecere pe sub podurile care tranzitează canalul este de 52 m.

1.3. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRIILOR EXPERIMENTALE EFECTUATE ASUPRA SQUATULUI NAVELOR MARITIME

Cercetările științifice asupra squatului au fost începute de *Constantine* (1960), acesta studiind comportamentul squatului pentru viteze subcritice, critice și supercritice. Metode mult mai practice, bazate pe cercetări experimentale, sunt prezentate de *Barrass* (1979), care a propus de asemenea o lățime echivalentă, luând în considerare lățimea canalului. Abordări generale sunt prezentate și de *Dumas* (1982), *Millard* (1990), *PIANC*⁴ (1997) și *Blaauw* și *Van der Knaap* (1983). *Jiang* și *Henn* (2003) prezintă o metodă numerică validă pentru viteze subcritice și supercritice. Squatul în zonele cu fund mîlos a fost investigat de *Sellmeijer* și *van Oortmerssen* (1983), *Doctors ș.a.* (1996) și cel mai recent de *Delefortrie ș.a.* (2010).

1.3.1. Tipuri de modele testate

Între anii 2001 și 2004, la Universitatea Ghent, Belgia, s-a studiat fenomenul squatului în zone cu fund mîlos pe trei modele de navă. Cercetările au fost efectuate într-un bazin cu dimensiunile 88 m × 7 m × 0,5 m. Un studiu publicat în 2013 prezintă interacțiunea dintre două tipuri de nave aflate într-un canal, în trecere una pe lângă cealaltă. Un alt studiu realizat asupra modelelor la scară a determinat squatul produs de o navă cu un coeficient de finețe bloc⁵ de 0,6, aflată într-un canal cu adâncime mică.

În anul 2013, pentru măsurarea squatului s-a utilizat un model de tanc petrolier KVLCC⁶ la scara 1:45,71, aflat într-un bazin cu adâncime variabilă. Bazinul de carene⁷, în care au fost efectuate testele, măsoară 220 m lungime, 9 m lățime și 3,8 m adâncime. Adâncimea apei (h) în bazin a fost variată cu ajutorul unui planșeu fals, obținându-se astfel valori diferite ale raportului h/T .

Majoritatea studiilor teoretice, numerice și experimentale asupra examinării și predicției squatului iau în considerare un singur parametru, viteza navei, și pleacă de la premiza că nava se deplasează pe un drum drept cu viteză constantă pe centrul canalului. În realitate, o navă este supusă efectului vântului și curentului, poate accelera sau decelera și trebuie să își modifice drumul. Într-un canal cu două sensuri, traiectoria navei este excentrică, iar hidrodinamica acesteia este influențată de interacțiunea cu alte nave pe timpul manevrelor de depășire sau de întâlnire [14].

1.3.2. Metode de măsurare, criterii de similitudine

Pentru a studia comportamentul navelor folosind modele, trebuie stabilite criteriile de similitudine: geometric, cinematic și dinamic. Pentru similaritatea cinematică și dinamică, numerele Froude, Strouhal, Webber și Reynolds trebuie să fie aceleași atât pentru navă, cât și pentru model. Pentru a reduce riscul apariției erorilor mari datorită inegalității numerelor Reynolds și Webber, modelul de navă trebuie să fie suficient de mare. În realitate, apar erori atunci când rezultatele obținute pe model sunt extrapolate pentru navă, fenomen cunoscut sub numele de efect de scară. Acesta se datorează inegalității altor numere adimensionale ale modelului și navei.

⁴ Permanent International Association of Navigation Congresses

⁵ coeficient de finețe bloc – mărime adimensională, subunitară ce reprezintă raportul dintre volumul carenei și volumul paralelipipedului în care se înscrie carena

⁶ KRISO (Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering) Very Large Crude Carrier

⁷ carenă – partea exterioară a corpului unei nave, care se găsește sub linia de plutire

1.3.3. Bazine de carene

Bazinul de carene utilizat de Universitatea Ghent, Belgia are următoarele dimensiuni 87,5 m lungime din care 68 m sunt utili pentru experimente, 7 m lățime și 0,5 m adâncime posibilă a apei. Dimensiunile bazinului sunt modeste, dar suficiente pentru a executa teste de manevră și sea-keeping pe modele având lungimi între 3,5 și 4,5 m, cu viteze până la 1,2 m/s (fig. 1.1). Pescajul modelelor de navă folosite variază între 0,1 și 0,2 m. Bazinul mai este prevăzut cu un generator de valuri ce permite studierea interacțiunii dintre nave sau efectul de banc.



Fig. 1.1. Sistemul de tractare pe șine al bazinului de carene [20]

La Facultatea de Arhitectura Navală din cadrul Universității “Dunărea de Jos” din Galați există, de asemenea, un bazin de carene de dimensiuni 45 m × 4 m × 3 m ce este echipat cu un sistem automat de tractare. Testele pe modele de navă de până la 4 m lungime și o masă maximă de 200 kg se pot executa până la viteze constante de 4 m/s.

CAPITOLUL 2

CONSIDERAȚII TEORETICE ȘI STUDII DE CAZ PRIVIND SQUATUL NAVELOR MARITIME

2.1. SQUATUL NAVAL

Squatul este o scădere a rezervei de apă sub chilă⁸, cauzată de mișcarea operei vii⁹ prin volumul de apă înconjurător. Comparată cu poziția neutră a navei, carena intră mai mult în apă și în același timp își va schimba asietă¹⁰.

Când o navă înaintază prin apă, aceasta împinge apa din prova ei. Pentru a nu exista un „gol” de apă, acest volum trebuie să se întoarcă, de-a lungul bordajului sub corpul navei. Curenții de curgere de sub navă își măresc viteza, cauzând o scădere de presiune ce duce la o mișcare pe verticală în jos a navei. În ape puțin adânci și/sau ape înguste, viteza de curgere a particulelor de apă crește, ceea ce conduce la o scădere de presiune, conform legii lui *Bernoulli*. Odată cu această mișcare pe verticală în jos, nava își va modifica asietă, înclinându-se spre prova sau spre pupa. Scăderea totală, la prova sau la pupa, a adâncimii libere sub chilă față de adâncimea când nava este pe chilă dreaptă se numește **squat** (fig. 2.1).

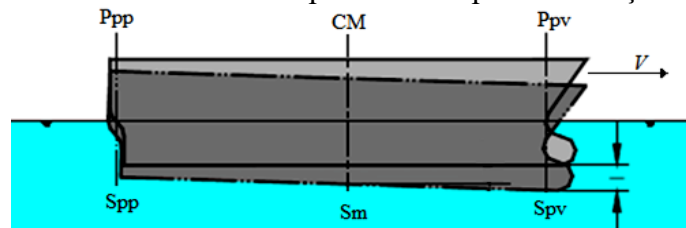


Fig. 2.1. Squatul naval (S_{pv} – squat la pupa, S_m – squat mediu, S_{pp} – squat la prova) [6]

⁸ chilă – element principal din structura longitudinală a navei, constituit dintr-o grindă metalică sau o filă de tablă groasă continuă instalată de la prova la pupa, în planul diametral, pe fundul navei

⁹ operă vie – termen naval care desemnează partea imersă a unei nave încărcate, mai precis partea din corp care se află sub linia de plutire

¹⁰ asietă – termen naval ce indică înclinarea longitudinală a unei nave, datorită repartizării neuniforme a încărcăturii sau a balastului

Pentru navele cu forme pline, cum ar fi tancurile petroliere sau cargourile, eșuarea apare în general la prova, iar pentru navele cu forme fine, ca navele de pasageri sau port – containerele, punerea pe uscat apare, de obicei, la pupa.

2.2. FACTORII DETERMINANȚI AI SQUATULUI

2.2.1. Caracteristicile navei

Principalii parametri ai navei ce influențează squatul sunt pescajul T , forma carenei, reprezentată prin coeficientul de finețe bloc C_B , viteza în m/s V_N sau în noduri V_K , lungimea navei între perpendiculare L_{pp} și lățimea b .

Coeficientul de finețe bloc este o măsură a *fineții* formei navei relativă la un volum paralelipipedic echivalent de aceleași dimensiuni. Valorile coeficientului de finețe bloc variază, de obicei, între 0,45 pentru navele cu forme fine și 0,85 pentru navele cu forme pline.

Cel mai important parametru este V_K , acesta fiind viteza navei prin apă, așadar sensul și viteza curenților de apă și curenților de maree trebuie luați în considerare. De obicei, squatul variază aproximativ cu pătratul vitezei. Cu alte cuvinte, dacă se reduce viteza la jumătate, squatul va deveni de patru ori mai mic [4].

De asemenea, există și doi parametri calculați pe baza dimensiunilor navei. Volumul de apă dezlocuit de navă este definit ca produsul dintre coeficientul de finețe bloc, lungimea între perpendiculare, lățime și pescaj,

$$\nabla = C_B \cdot L_{pp} \cdot b \cdot T \quad [\text{m}^3]. \quad (2.1)$$

Aria suprafeței maestre imerse este A_N și se definește ca

$$A_N = 0,98 \cdot b \cdot T \quad [\text{m}^2]. \quad (2.2)$$

2.2.2. Configurația canalelor

Principalele tipuri de configurații ale șenalelor navigabile sunt cele deschise sau nerestricționate, limitate în lateral (dragate la fund) și tip canal.

Șenalele nerestricționate (fig. 2.2.a) sunt întinderi de apă relativ mari, fără restricții laterale, dar cu adâncimi mici, și se întâlnesc de obicei la intrările pe canale. Al doilea tip de șenal (fig. 2.2.b) prezintă la fundul său un șanț subacvatic dragat, de adâncime h_T , și care nu iese la suprafața apei. Șenalul este definit de adâncimea totală h și lățimea la fundul canalului W . Ultimul tip de configurație este cea de tip canal (fig. 2.2.c). Aceasta caracterizează canalele cu maluri consolidate, ce pot sau nu fi expuse fluctuațiilor mării. Configurația de tip canal se caracterizează prin: lățimea la fundul canalului W , adâncimea h și panta n a peretelui lateral sau a malului, unde $n = 1/\text{tg } \theta$ [6].

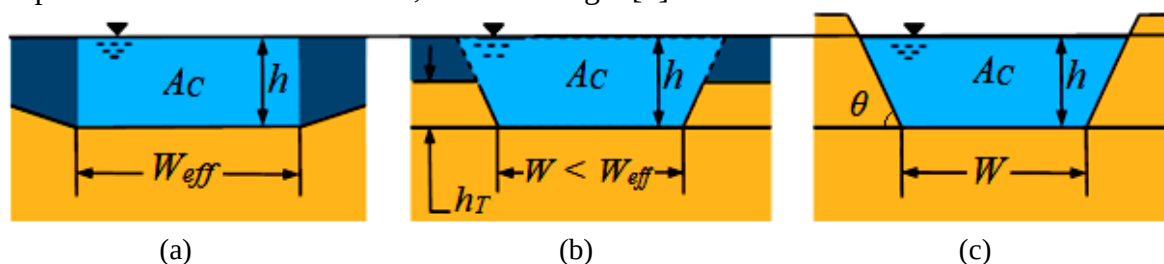


Fig. 2.2. Reprezentare schematică a tipurilor de secțiuni transversale ale șenalelor [8]

2.2.3. Combinația între caracteristicile navei și ale canalului

Câțiva parametri adimensionali sunt necesari a fi folosiți în formulele de calcul al squatului, cel mai important fiind numărul Froude de adâncime Fr_h , care este o măsură a rezistenței la înaintare a navei în ape cu adâncimi mici.

Al doilea parametru adimensional este factorul de blocaj, S și reprezintă raportul dintre secțiunea maestră imersă a navei, A_N și secțiunea transversală a canalului sau a șenalului navigabil, A_C (fig. 2.3). Acesta este definit ca

$$S = \frac{A_N}{A_C} = \frac{0,98 \cdot b \cdot T}{B \cdot h}. \quad (2.3)$$

Valorile factorului de blocaj sunt, de regulă, cuprinse între 0,03 și 0,25 sau mai mari pentru șenale restricționate (dragate la fund) sau canale, și 0,10 sau mai puțin pentru șenale nerestricționate [4].

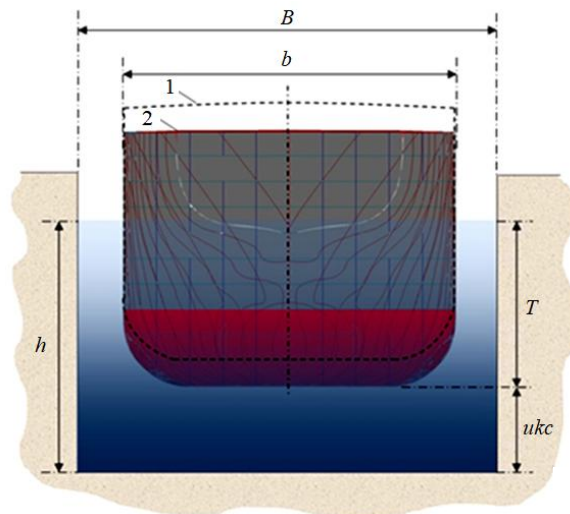


Fig. 2.3. Navă într-un canal

(B – lățimea canalului, h – adâncimea apei, b – lățimea navei, T – pescajul navei, ukc – rezerva de apă sub chilă; 1 – poziția navei în staționare, 2 – poziția navei la viteza V_K)

2.2.4. Lățimea de influență

Dacă o navă se află în condiții de mare liberă, dar cu adâncimi mici, atunci există două limite artificiale la tribord și la babord, paralele cu planul diametral al navei, în afara cărora un obstacol nu poate aduce nicio modificare asupra vitezei navei, a rezistenței la înaintare sau a squatului. Această limită artificială este cunoscută ca *lățimea de influență*, notată cu F_B .

2.2.5. Adâncimea de influență

Există, de asemenea o *adâncime de influență*, notată cu F_D , care definește o limită artificială de adâncime. Dacă adâncimea apei h este mai mare decât adâncimea de influență, nava nu este influențată de fundul șenalului sau canalului navigabil. În caz contrar, prezența fundului va produce modificări ale hidrodinamicii navei și poate influența squatului.

Se spune că o navă se află în condiții de “*ape libere*”, atunci când aceasta navighează în ape cu adâncime mică, dar fără restricții laterale. O navă care se găsește în ape de mică adâncime și are restricții laterale se consideră a fi în condiții de șenal îngust sau “*ape restricționate*”.

2.2.6. Efectele adâncimii limitate și a navigației pe canale asupra rezistenței la înaintare a navei

Adâncimea limitată influențează atât rezistența de vâscozitate, cât și rezistența de val. Astfel, în stratul limită apar zone de creștere a vitezei locale, care determină mărirea tensiunilor tangențiale și a rezistenței de frecare. De asemenea, are loc și o accentuare a căderilor de presiune, ce conduc la desprinderea stratului limită și la creșterea rezistenței de formă.

2.3. CALCULUL SQUATULUI MAXIM

Formula de calcul al squatului a fost concepută pentru a satisface o estimare a squatului maxim pentru navele ce navighează atât în strâmtori, canale sau locuri de trecere înguste, cât și în condiții de șenal deschis sau nerestricționat. Formula dezvoltată de Barrass este printre cele mai simple și ușor de folosit pentru toate tipurile de configurații ale canalelor. Bazată pe cercetările sale din anii 1979, 1981 și 2004, formula squatului maxim se determină în funcție de coeficientul de finețe bloc C_B , factorul de blocaj S și viteza navei în noduri V_K .

Squatul maxim $S_{\max}$ este egal cu

$$S_{\max} = \frac{C_B \cdot S^{0,81} \cdot V_K^{2,08}}{20} \quad [\text{m}]. \quad (2.4)$$

Principalul factor este viteza navei. Cercetările aprofundate au arătat că squatul variază cu viteza la puterea 2,08. În acest context, V_K este viteza navei prin apă; așadar efectul curentului sau al mareei trebuie luat în considerare.

Valoarea coeficientului de finețe bloc C_B determină dacă squatul maxim $S_{\max}$ se produce la prova sau la pupa în cazul navei cu asietă zero. Navele cu forme pline, având $C_B > 0,700$ au tendința să aibă squatul la prova, în timp ce navele cu forme fine, cu $C_B < 0,700$, tind să îl aibă la pupa. Navele cu $C_B = 0,700$ au caracteristică o afundare pe toată lungimea navei egală cu valoarea squatului maxim [3].

Figura 2.4 arată squatul maxim pentru navele comerciale ce au coeficientul de finețe bloc C_B cuprins între 0,500 și 0,900, atât în condiții de ape libere, cât și în locuri înguste. Pentru a putea utiliza diagrama sunt necesare a fi cunoscute trei valori: coeficientul de finețe bloc, viteza navei și condițiile de navigație (șenal nerestricționat, dar cu adâncimi mici sau râu/canal îngust). După cunoașterea acestor informații și o evaluare rapidă a graficului va rezulta o aproximare a squatului navei. Dacă rezerva de apă sub chilă, după ce se ia în considerare creșterea pescajului datorită squatului, nu este suficient de mare pentru navigația în condiții de siguranță, atunci viteza navei trebuie redusă [3].

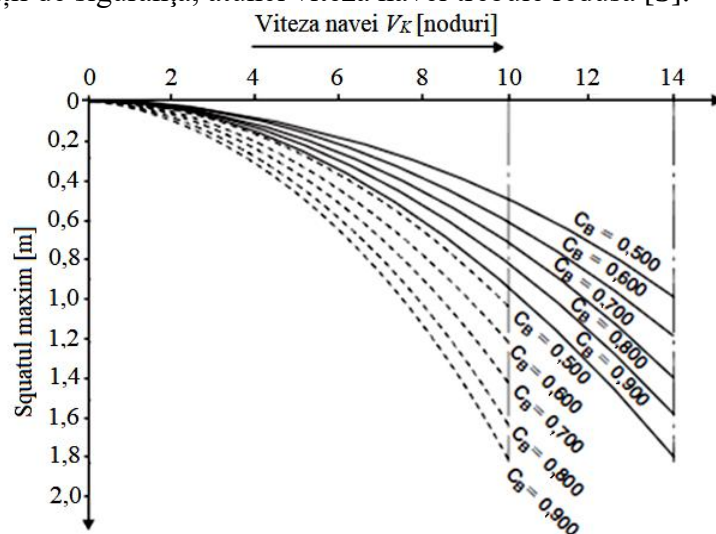


Fig. 2.4. Squatul maxim al navelor în condiții restricționate și nerestricționate (----- reprezintă nava aflată în canal restricționat, unde $S = 0,100 - 0,266$; — reprezintă nava aflată în ape libere unde $h/T = 1,10 - 1,40$) (prelucrare după Barrass [3])

2.4. RELAȚII EMPIRICE ALE SQUATULUI

Cele mai reprezentative formule de calcul al squatului sunt prezentate în continuare. Unele dintre acestea oferă rezultate bune, fiind des validate, altele sunt bazate pe cercetări mai recente. Tabelul 2.1 prezintă caracteristicile canalelor pentru care aceste formule pot fi aplicate și parametrii restrictivi conform condițiilor individuale de testare ale acestora.

Tabelul 2.1. Valorile parametrilor restrictivi ai formulelor de calcul al squatului (prelucrare după Briggs [6])

Formula	Tipul canalului*			Tipul restricției				
	N	R	C	C_B	b/T	h/T	L/b	L/T
Barrass	X	X	X	0,5 – 0,9		1,1 – 1,5		
Eryuzlu și Hausser	X			$\geq 0,8$		1,08 – 2,75		
Eryuzlu ș.a.	X	X		$\geq 0,8$	2,4 – 2,9	1,1 – 2,5	6,7 – 6,8	
Huuska	X	X	X	$0,6 \geq 0,8$	2,19 – 3,5	1,1 – 2,0	5,5 – 8,5	16,1 – 20,2
ICORELS ¹¹	X							
Yoshimura	X	X	X	0,55 – 0,8	2,5 – 5,5	$\geq 1,2$	3,7 – 6,0	
Millward	X			0,44 – 0,83				
Romisch	X	X	X		2,6	1,19 – 2,25	8,7	22,9
Soukhomel și Zass	X					1,2 – 1,5	3,5 – 9,0	

* N – șenal nerestricționat, R – șenal restricționat, C – canal

Toate aceste formule oferă pentru toate tipurile de canale predicții ale squatului produs la prova, S_{pv} , cu excepția formulei lui Romisch, care dă predicția squatului și la pupa S_{pp} . Formula lui Barrass calculează squatul la pupa pentru șenale nerestricționate, iar pentru canale și șenale restricționate, acesta depinde de valoarea coeficientului de finețe bloc, C_B . Fiecare formulă are anumite constrângeri care trebuie să fie satisfăcute, înainte de a fi aplicate. Dacă aceste formule sunt folosite în alte condiții decât cele pentru care au fost dezvoltate, trebuie să se acorde o atenție deosebită.

¹¹ International Commission for the Reception of Large Ships

2.5. SQUATUL NAVELOR ȘI ÎNCLINAREA LONGITUDINALĂ

Dacă se consideră că navele au asietă zero, pentru o anumită valoare a vitezei și a coeficientului de finețe bloc, atunci se poate calcula squatul maxim, acesta manifestându-se la pupa, la prova sau pe toată lungimea navei.

Dacă în schimb se consideră că navele au deja o înclinare longitudinală statică, în marș, squatul maxim se manifestă în funcție de cum este înclinată nava. Testele efectuate pe modele navale, precum și pe nave în mărime naturală au arătat următoarele:

- dacă o nava este apupată când se află în staționare, atunci ea are squatul maxim la pupa, când se află în marș;
- dacă o navă este aproată când se află în staționare, atunci ea are squatul maxim la prova, când se află marș.

2.6. STUDIU DE CAZ ASUPRA SQUATULUI ÎN CANALUL SULINA UTILIZÂND SIMULATORUL DE NAVIGAȚIE NTPRO 5000

Acest subcapitolul prezintă un studiu de caz asupra fenomenului de squat prin simularea navigației la intrarea în Canalul Sulina a patru nave militare din cadrul simulatorului de navigație NTPRO 5000. Scopul acestor simulări a fost de a vedea ce tipuri de nave militare pot naviga prin Canalul Sulina și care este viteza maximă admisă, fără a eșua din cauza squatului. Până în prezent nu au mai fost efectuate simulări asupra fenomenului de squat la nave militare în Canalul Sulina.

2.6.1. Testele simulate

Navele folosite pentru simulări au fost două fregate, o navă de patrulare (OPV¹²) și o navă multirol de suport (MSS¹³), care au caracteristici similare cu navele militare din Forțele Navale Române. Caracteristicile tehnice ale acestora sunt prezentate în tabelul 2.2.

Tabelul 2.2. Caracteristicile navelor militare

Caracteristici	U.M.	Fregata 1	Fregata 2	MSS	OPV
Deplasament	[t]	3664	3600	2250	1706
Lungime	[m]	130,5	118	73	85
Lățime	[m]	14,6	14,8	13,8	14
Pescaj prova/ pupa	[m]	3,92/ 4,64	4,37/ 4,37	4,3/ 4,3	3,56/ 3,63
Viteza maximă	[noduri]	32,4	26,6	13,6	22,5

Simulările încep cu navele aflate la intrarea în canal, pe mijlocul acestuia și navighează în amonte, la viteză constantă (fig. 2.5). Pe timpul testelor efectuate, trecerea navelor a fost observată pe o distanță de o milă marină¹⁴, după care exercițiul a fost oprit.

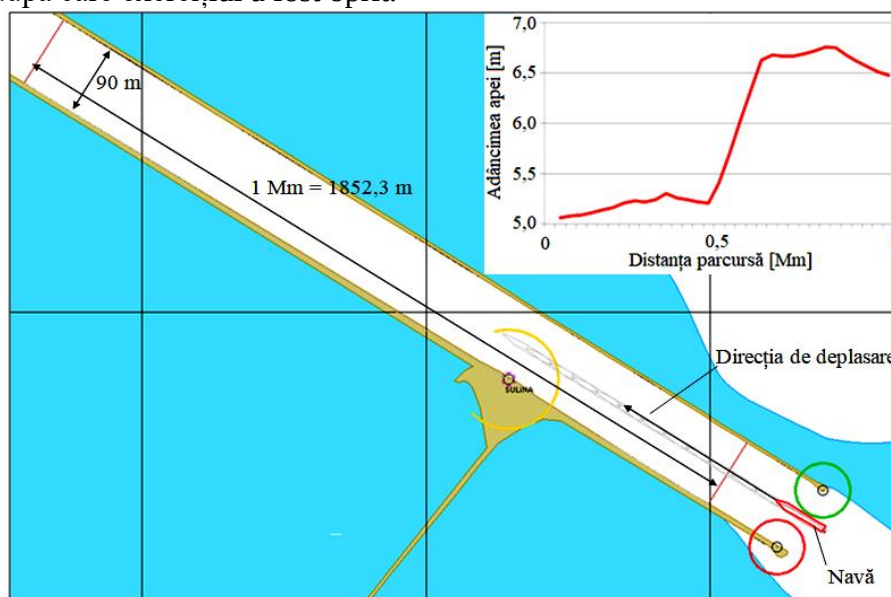


Fig. 2.5. Intrarea în Canalul Sulina. Variația adâncimii apei [TRANSAS Navi-Sailor 4000]

¹² Offshore patrol vessel

¹³ Multirole support ship

¹⁴ milă marină – unitate de măsură a distanței, utilizată în marină și în aviație, egală cu 1852,3 m

În cadrul simulatorului de navigație NTPRO 5000, adâncimea apei din zona aleasă a variat de la 5 la 7 m și luând în considerare pescajele navelor, dar și lățimea canalului de 90 m, se poate spune că sunt îndeplinite condițiile de zonă restricționată cu apă mică. Așadar, atunci când navele trec prin aceste zone sunt afectate de fenomenul de squat și suferă o creștere a pescajului. Viteza inițială V_K folosită pentru teste a pornit în fiecare caz de la 4 noduri (aproximativ 2,06 m/s), fiind crescută constant până ce navele au eșuat din cauza squatului.

2.6.2. Interpretarea rezultatelor

Prin analiza rezultatelor obținute în urma simulărilor s-a arătat care este viteza maximă a fiecărei nave ce permite navigația prin Canalul Sulina fără a pune nava pe uscat și cum variază squatul atunci când navele se află în mișcare.

❖ Fregata 1

În timpul testelor efectuate, viteza navei a fost crescută consecutiv de la 4 la 8 și 12 noduri. Pescajul este constant pe timpul trecerii prin canal; la 4 noduri, pescajul navei la prova nu suferă modificări, dar la pupa, acesta crește ușor datorită efectului de squat, de la 4,6 m, în condiții statice, la 4,7 m. La această viteză squatul este foarte mic, 0,1 m. După primul test al Fregatei 1, exercițiul a fost reluat în aceleași condiții, dar cu viteza de 8 noduri. În acest caz, pescajul navei crește datorită efectului de squat, atingând o valoare maximă de 3,96 m la prova și 4,85 m la pupa. Atunci când apa devine mai adâncă, squatul devine mai mic, iar pescajul scade. Al treilea test a fost efectuat la viteza de 12 noduri. La această viteză, pescajul la prova este mai mare cu 0,01 m decât în cazul precedent, în timp ce la pupa, acesta crește la o valoare maximă de 5,01 m. Așadar, Fregata 1 nu poate naviga în canal cu viteza de 12 noduri, viteza maximă fiind 8 noduri, iar viteza de siguranță 4 noduri.

❖ Fregata 2

La testele efectuate cu Fregata 2, viteza a fost crescută consecutiv de la 4 noduri la 8, 12 și 14 noduri. La 4 noduri, efectul de squat produce o creștere ușoară a pescajului, de la 4,37 m la prova în condiții statice, la 4,4 m, respectiv 4,44 m la pupa. În acest caz rezerva de apă sub chilă permite navigația fregatei prin canal.

Pentru 8 și 12 noduri, trendul pescajelor și al rezervei de apă sub chilă este similar cu cel de la Fregata 1. Testul efectuat la 14 noduri a arătat că pescajul la prova crește ușor de la 4,31 m la 4,45 m, în timp ce la pupa, acesta scade de la 4,94 m la 4,92 m, în momentul când nava atinge limita de o milă marină. Rezerva de apă sub chilă este de 0,78 m la prova și 0,08 m la pupa, ceea ce face ca nava să se pună pe uscat la viteze mai mari de 14 noduri.

❖ Nava multirol de suport (MSS)

Pentru această navă vitezele testate au fost de 4 și 8 noduri, deoarece la viteze mai mari nava eșuează, deși nave mai mari (Fregata 1 și 2) pot naviga cu viteze de până la 12 noduri. Acest fapt poate fi explicat de valoarea coeficientului de finețe bloc, $C_B = 0,507$, mai mare decât la celelalte nave și de valoarea factorului de blocaj $S = 0,130$, care produc un squat mai mare decât rezerva de apă existentă. Trendul pescajelor și al rezervei de apă este similar cu cel de la Fregatele 1 și 2, dar și diferența de viteză este asemănătoare, cu ușoare variații la viteza de 8 noduri.

❖ Nava de patrulare (OPV)

În acest caz, vitezele folosite au fost de 4, 8, 12, 16 și 20 noduri. La primele două teste (4 Nd și 8 Nd) nu au fost observate modificări majore ale trendului pescajului și rezervei de apă față de celelalte nave studiate. La viteza de 12 noduri însă, pescajul la prova crește în momentul când apa devine mai adâncă, de la 3,59 m și la 3,64 m, în timp ce pescajul la pupa scade de la 3,98 m la 3,83 m. Rezerva de apă sub chilă rămâne pozitivă, având o valoare minimă la pupa de 0,84 m, ceea ce face posibilă navigația pe canal. La viteza de 16 noduri, trendul pescajului și al rezervei de apă sub chilă este similar cu cel de la 12 noduri, pescajul la pupa având o valoare maximă de 4,21 m. La 20 de noduri, nava se apușează și mai mult, pescajele având variații mici față de testele precedente; la prova între 3,27 m și 3,38 m, iar la pupa între 4,1 m și 4,23 m. Rezerva de apă sub chilă variază de la 1,67 m la 3,87 m la prova și de la 0,57 m la 3,15 m la pupa. La această viteză, stabilitatea și manevrabilitatea navei sunt afectate considerabil de valurile reflectate de malurile canalului, generate la rândul lor de valurile mari produse de navă.

CAPITOLUL 3

ANALIZA SQUATULUI ȘI A REZERVEI DE APĂ SUB CHILĂ PENTRU DIFERITE TIPURI DE NAVE

3.1. CALCULUL SQUATULUI ȘI AL REZERVEI DE APĂ SUB CHILĂ

Problema determinării squatului și a rezervei de apă sub chilă este deosebit de importantă pentru nave, mai ales în condiții de navigație cu ape puțin adânci și în special în zone înguste. Pentru a vedea cum variază squatul diferitelor tipuri de nave în funcție de vitezele reale, permise la navigația pe canale, s-au făcut calcule pentru determinarea acestuia.

În primul rând, este necesar a cunoaște principalele dimensiuni ale diferitelor nave folosite astăzi în navigația modernă. Au fost selectate cele mai reprezentative categorii de nave din industria navală, iar, pentru fiecare categorie, s-au luat dimensiunile medii ale navelor, cum ar fi lungimea între perpendiculare, lățimea, pescajul, coeficientul de finețe bloc sau viteza de croazieră, rezultatele fiind trecute în tabelul 3.1.

Tabelul 3.1. Dimensiunile medii ale diferitelor tipuri de nave [4]

Tipul navei	L_{pp} [m]	b [m]	T [m]	C_B	F_B [m]	F_D [m]	V_K [nd]
ULCC ¹⁵	350	65	23	0,850	525,2	126,1	14,5
VLCC ¹⁶	318	60	20	0,825	497,4	114	15,5
Tanc petrolier	212,5	32,5	12	0,800	276,6	71,16	15,5
Navă transport mărfuri vrac	212,5	34,4	12,4	0,775	300,7	76,6	14,5
Navă mărfuri generale	125	20	7,8	0,700	190,6	55,1	14,5
Navă de pasageri	230	30	7,6	0,625	315	62,2	25
Navă port – container	250	37,5	11,4	0,575	422,6	104	23
Navă RO – RO	179,5	31,3	7,3	0,560	306,7	68,9	21
Remorcher	36,5	12,5	5,5	0,500	158,6	60,1	10

Pentru acest studiu s-au ales două tipuri de canale teoretice, dar cu dimensiuni apropiate de cele ale unor canale reale. Primul are o secțiune transversală rectangulară, de lățime $B = 123$ m și adâncime $h = 24$ m (fig. 3.1). Al doilea tip de canal are o secțiune transversală trapezoidală, de forma secțiunii Canalului Suez, având lățimea la suprafața apei, $W_0 = 313$ m, lățimea la fundul apei, $W = 121$ m și adâncimea, $h = 24$ m (fig. 3.2).

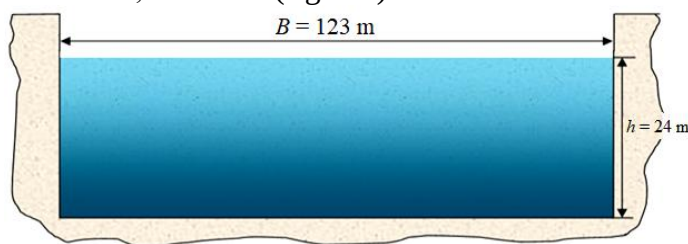


Fig. 3.1. Canal rectangular – secțiune transversală

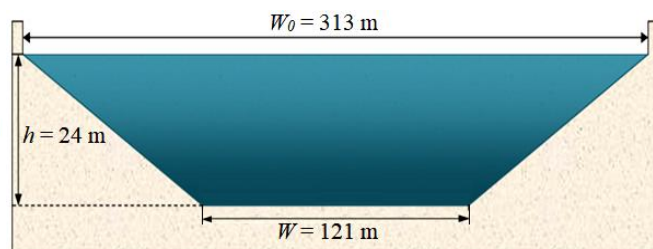


Fig. 3.2. Canal trapezoidal – secțiune transversală

În ultimul rând, au fost stabilite vitezele care s-au luat în considerare la determinarea squatului. Pentru această analiză a squatului s-au considerat vitezele de 6, 8, 10 și 12 noduri (aproximativ 3, 4, 5 și respectiv 6 m/s).

Pentru determinarea squatului maxim S_{max} s-a ales formula lui Barrass (2.4) deoarece aceasta este printre cele mai simple, ușor de aplicat și valabilă pentru mai multe tipuri de nave și configurații de șenale. Factorul de blocaj S s-a calculat cu relația (2.3), iar rezultatele obținute împreună cu valoarea ariilor secțiunilor maestre imerse ale navelor au fost trecute în tabelul 3.2.

Considerând canalul cu secțiune rectangulară și vitezele menționate anterior, pentru tipurile de nave alese, s-au obținut valorile squatului maxim și ale rezervei de apă sub chilă ukc (under keel clearance), determinată cu relația

$$ukc = h - T - S_{max} \quad [\text{m}]. \quad (3.1)$$

¹⁵ Ultra Large Crude Carrier

¹⁶ Very Large Crude Carrier

Tabelul 3.2. Factorii de blocaj pentru cele două tipuri de canale

Tipul navei	b [m]	T [m]	A_N [m ²]	S_1	S_2
ULCC	65	23	1465,1	0,496	0,281
VLCC	60	20	1176	0,398	0,226
Tanc petrolier	32,5	12	382,2	0,129	0,073
Navă transport mărfuri vrac	34,4	12,4	418	0,142	0,080
Navă mărfuri generale	20	7,8	152,9	0,052	0,029
Navă de pasageri	30	7,6	223,4	0,076	0,043
Navă port – container	37,5	11,4	418,9	0,142	0,080
Navă RO – RO	31,3	7,3	223,9	0,076	0,043
Remorcher	12,5	5,5	67,4	0,023	0,013

Analizând toate rezultatele obținute se concluzionează că o navă de tip ULCC nu poate naviga pe un canal rectangular având dimensiunile specificate, indiferent de viteza sa, iar o reducere a vitezei sub 6 noduri, pentru a obține un squat mai redus și implicit o rezervă de apă sub chilă pozitivă, duce la scăderea manevrabilității navei. Navele tip VLCC pot tranzita un astfel de canal până la viteza de 8 noduri. Peste această viteză, rezerva de apă sub chilă este foarte redusă și nu permite navigația în siguranță. Squatul pentru celelalte tipuri de nave se încadrează în limite normale, iar rezerva de apă sub chilă este suficientă chiar și la viteze de 12 noduri.

În etapa următoare s-au efectuat calcule pentru aceleași tipuri de nave, aceleași viteze, dar pentru canalul cu secțiune trapezoidală. În urma analizei rezultatelor reiese că nici pe canalul cu secțiune trapezoidală nava de tip ULCC nu poate naviga fără a eșua. Spre deosebire de canalul rectangular ce permitea navelor VLCC să navigheze cu o viteză de maxim 8 noduri, canalul trapezoidal oferă posibilitatea navigării acestor tipuri de nave chiar și cu viteze de 12 noduri.

În figurile 3.3 și 3.4 se poate observa că la toate tipurile de nave squatul crește odată cu viteza. Cea mai mare creștere este la navele ULCC ($C_B = 0,850$) și VLCC ($C_B = 0,800$). La polul opus, remorcherele ($C_B = 0,500$) au variații mici ale squatului de la o viteză la alta.

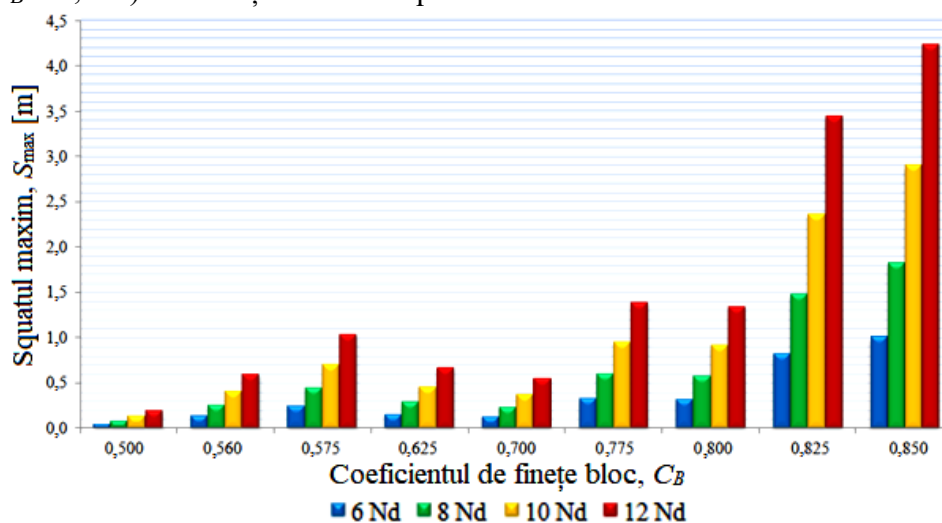


Fig. 3.3. Squatul naval la vitezele considerate în canalul rectangular, pentru diferite valori ale coeficientului de finețe bloc

Modificând secțiunea transversală a canalului de la cea rectangulară la cea trapezoidală se observă că valorile squatului maxim scad cu 37 %. Așadar, un canal mai lat este potrivit pentru navele VLCC, în timp ce restul navelor considerate nu depind de forma secțiunii transversale a canalului, acestea putând naviga cu toate vitezele considerate. Spre deosebire de acestea, navele tip ULCC nu îndeplinesc condițiile unei rezerve de apă sub chilă suficiente pentru a permite navigația, în cele mai multe din cazuri acestea punându-se pe uscat.

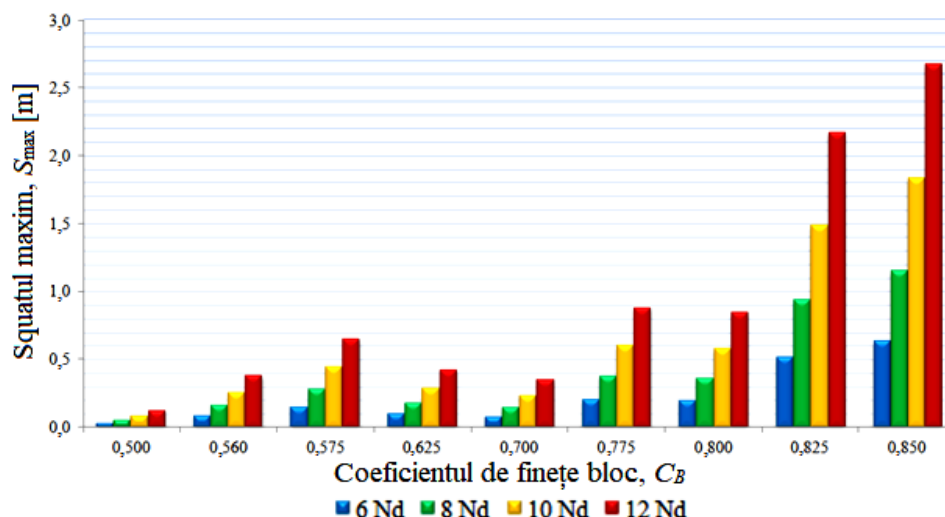


Fig. 3.4. Squatul naval la vitezele considerate în canalul trapezoidal, pentru diferite valori ale coeficientului de finețe bloc

3.2. CALCULUL SQUATULUI PENTRU O NAVĂ TIP GENERAL CARGO ÎN DIFERITE CANALE DE SECȚIUNE TRAPEZOIDALĂ

3.2.1. Proiectarea navei în programul Autoship

Programul Autoship dezvoltat de Autoship Systems Corporation reprezintă un software de inginerie marină care furnizează soluții software de vârf pentru două mari categorii de industrii marine: industria de proiectare și construcții navale și industria de transport maritim.

În urma studierii bibliografiei de specialitate și a dimensiunilor navelor actuale, pentru exemplificare, s-a ales modelarea unei nave de tip general cargo (transport mărfuri generale), cu dimensiunile prezentate în tabelul 3.3.

Tabelul 3.3. Principalele caracteristici ale navei tip general cargo

Caracteristică	Dimensiune	U.M.
Lungimea maximă L	128	[m]
Lățimea b	20,5	[m]
Pescajul T	6,5	[m]
Înălțimea de construcție D	15,5	[m]
Coeficientul de finețe bloc C_B	0,700	—

Forma finală a navei, în urma parcurgerii etapelor de modelare este prezentată în figura 3.5. Programul Autoship oferă posibilitatea vizualizării navei în toate cele trei plane, dar și tridimensional, cu opțiunea de rotire a corpului navei în orice direcție.

Geometria navei se concretizează prin planul de forme care se obține secționând nava cu plane paralele cu planele principale și suprapunând curbele rezultate. Acesta este util în efectuarea calculului necesare la proiectarea navei, cât și în timpul exploatării acesteia; spre exemplu, la andocare sau la reparațiile care se execută la corp, atunci când este nevoie de detalierea formelor navei în anumite zone.

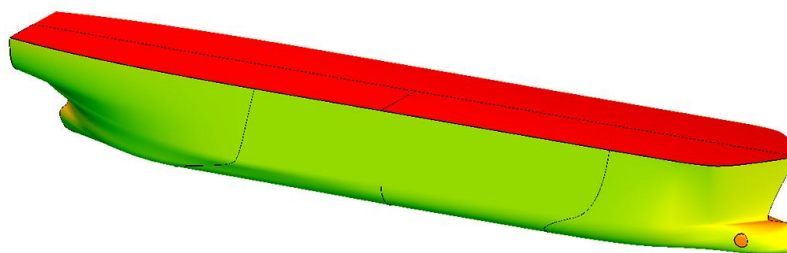


Fig. 3.5. Vedere 3D asupra navei

Determinarea principalelor planuri de proiecție, precum și interpretarea corectă a datelor furnizate de planul de forme constituie o competență indispensabilă ofițerului de marină, oferind astfel posibilitatea optimizării timpului în procesul de ambarcare – debarcare a încărcăturii, precum și o mai bună cunoaștere a structurii navei.

3.2.2. Calculul squatului navei tip general cargo

Nava de tip general cargo prezentată în subcapitolul 3.2.1. a fost folosită pentru calculul squatului la diferite viteze de deplasare în canale trapezoidale de diferite dimensiuni. Viteza navei, V_K , a crescut progresiv de la 0 la 15 noduri (aproximativ 7,7 m/s). De asemenea, pentru calculul factorului de blocaj S , au fost luate în considerare lățimea, pescajul navei și dimensiunile canalului.

Canalul teoretic considerat a fost variat de la dimensiunile unui șenal navigabil lat și adânc, până la condiții foarte restrictive, cu rezerve de apă sub chilă de doar câteva procente din pescajul navei. Prin urmare, au fost variate lățimea la baza canalului, W , de la $1,05 \cdot b$ până la $2,50 \cdot b$ (b – lățimea navei), și adâncimea, h , de la $1,05 \cdot T$ la $1,50 \cdot T$ (T – pescajul navei) (fig. 3.6). Lățimea canalului la suprafața apei (W_0) s-a considerat egală cu de 3 ori lățimea la bază (W); excepție face ultima situație analizată, unde aceasta a fost de 2,5 ori lățimea la bază.

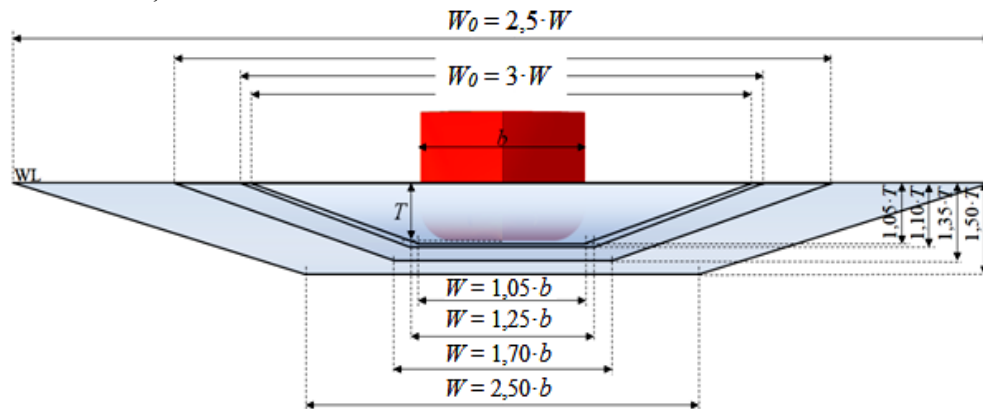
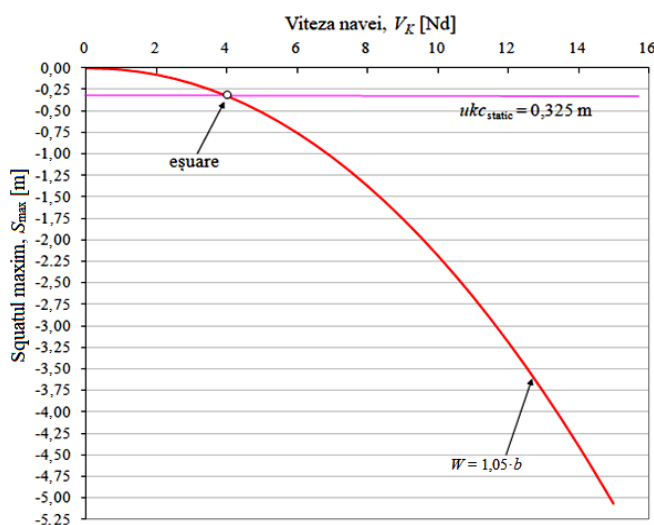


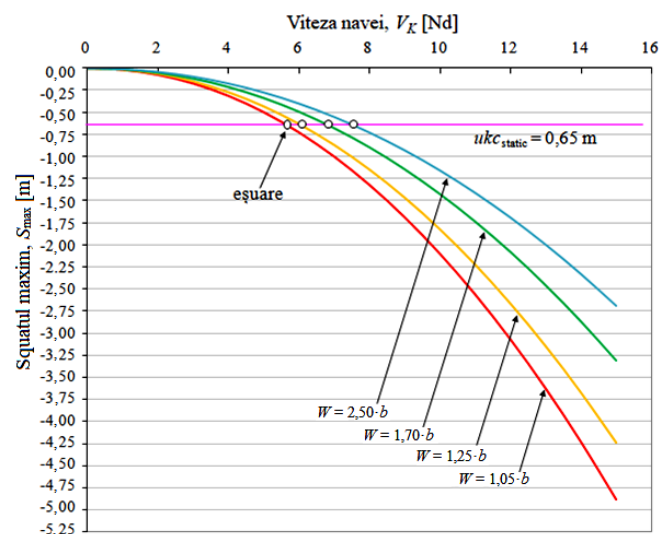
Fig. 3.6. Configurațiile pentru canalul trapezoidal

Analizând squatul pentru toate configurațiile de canal și vitezele modelului de navă s-au obținut patru grafice (fig. 3.7) pentru fiecare adâncime considerată. În cazul primei configurații a canalului (fig. 3.7.a) se poate observa că la viteza de 4 noduri nava deja se pune pe uscat. Când adâncimea canalului este $1,10 \cdot T$ (fig. 3.7.b), rezerva de apă sub chilă crește la 0,65 m. Pentru fiecare lățime a canalului, eșuarea navei apare la viteza de 5,66 noduri (pentru $W = 1,05 \cdot b$), 6,08 noduri (pentru $W = 1,25 \cdot b$), 6,85 noduri (pentru $W = 1,70 \cdot b$) și 7,55 noduri (pentru $W = 2,50 \cdot b$).

Creșterea adâncimii apei are ca efect creșterea rezervei de apă sub chilă, iar la lățimi mai mari ale canalului, riscul eșurării navei este diminuat pentru viteze mai mari. Astfel, pentru situația când adâncimea canalului este $1,35 \cdot T$ (fig. 3.7.c), rezerva de apă sub chilă crește la 2,275 m. Pentru ultima adâncime considerată ($1,5 \cdot T$) (fig. 3.7.d) rezerva de apă sub chilă crește la 3,25 m, iar eșuarea se produce pentru cel mai îngust canal ($1,05 \cdot b$) la viteza de 13,91 noduri și pentru canalul de lățime $W = 1,25 \cdot b$ la viteza de 14,89 noduri. Pentru cele două lățimi rămase, nava poate tranzita canalul fără a eșua.



(a) $h = 1,05 \cdot T$



(b) $h = 1,10 \cdot T$

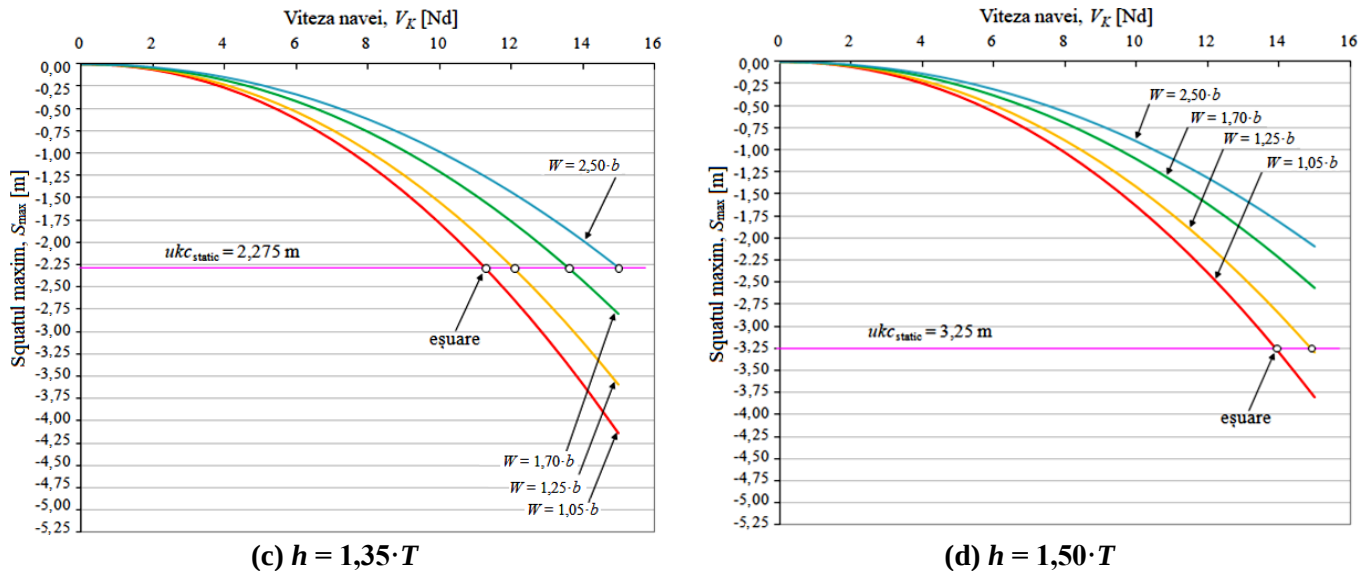


Fig. 3.7. Variația squatul în funcție de viteza navei pentru fiecare adâncime și lățime ale canalului considerate

CAPITOLUL 4

STUDIUL INTERACȚIUNII NAVĂ – NAVĂ ȘI NAVĂ – MAL ÎN CANALE

4.1. INTERACȚIUNEA NAVELOR. CAUZE ȘI EFECTE

4.1.1. Domeniul de presiuni hidrodinamice al navelor

Interacțiunea dintre nave este un fenomen asociat cu squatul naval și face subiectul cercetărilor științifice de multă vreme. În general, majoritatea studiilor se bazează pe formule empirice, instrumente experimentale sau tehnici numerice (CFD), dintre care primele două metode sunt cel mai des utilizate.

Manevrele de întâlnire în ape puțin adânci pot produce abateri semnificative ale navei de la drum și pot afecta siguranța navigației dacă nu sunt înțelese, anticipate și corectate. În navigație, interacțiunea apare atunci când domeniile de presiune din jurul navelor interacționează.

Efectele interacțiunii sunt multiple, unele cu consecințe grave pentru navă, cum ar fi eșuarea sau coliziunea. Cauza producerii acestor efecte este interacțiunea dintre câmpurile de presiune hidrodinamică produse de nave pe timpul mișcării. O navă aflată în mișcare are două zone (bulbi) de presiune pozitivă la prova și la pupa, iar de-a lungul bordurilor un câmp de presiune negativă, care formează împreună, în jurul operei vii, un domeniu de formă eliptică (fig. 4.1). Când aceste domenii de presiune ale navelor intră în contact se produc efecte vizibile, care devin mai pronunțate în zonele cu adâncimi mici.

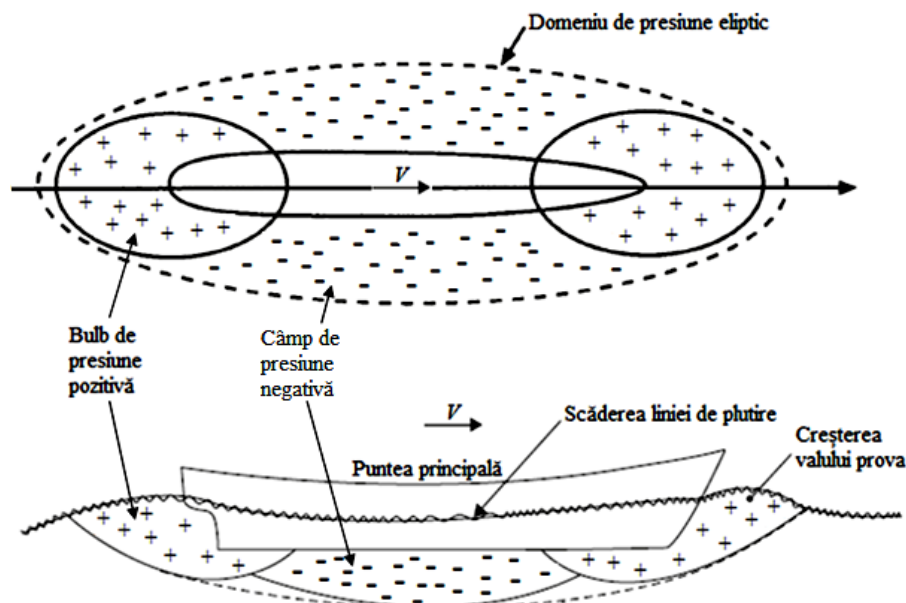


Fig. 4.1. Distribuția câmpurilor de presiune în jurul carenei navei (prelucrare după Barrass [3])

4.1.2. Interacțiunea navă – fund în canale

S-a observat că în zone restricționate din punctele de vedere al lățimii și adâncimii, squatul navelor, care oricum se produce atunci când nava se deplasează, crește la trecerea navelor una pe lângă cealaltă.

De asemenea, la trecerea navelor una pe lângă cealaltă, creșterea squatului afectează înclinarea longitudinală a acestora, dar mai apare și un squat transversal ce înclină navele într-unul din borduri.

4.1.3. Interacțiunea navă – navă în canale

Traficul naval intens, transferul de materiale pe mare și operațiunile navelor în porturi sunt caracterizate de interacțiuni navă – navă tot mai frecvente. Interacțiunea între nave este mai pronunțată la viteze mari ale acestora, o distanță mică între ele și o rezervă de apă sub chilă redusă. Trebuie reținut faptul că, o viteză corectă de deplasare și o distanță suficient de mare între nave, sunt indispensabile pentru a evita sau minimiza efectele interacțiunii [3].

4.1.3.1. Întâlnirea navelor într-un canal

Din punct de vedere al interacțiunii, trecerea navelor una pe lângă cealaltă este rapidă, de multe ori acestea neavând timp la dispoziție pentru a reacționa la forțele și momentele ce apar. Efectul principal simțit de nave este un moment de rotire în jurul axei verticale ce împinge prova spre peretele canalului. Când provele navelor interacționează, momentul creat este mai slab și ușor de controlat, dar la îndepărtarea navelor, acesta devine mai puternic și poate provoca uneia dintre nave, dacă nu este anticipat, abaterea bruscă spre malul adiacent (fig. 4.2) [3].

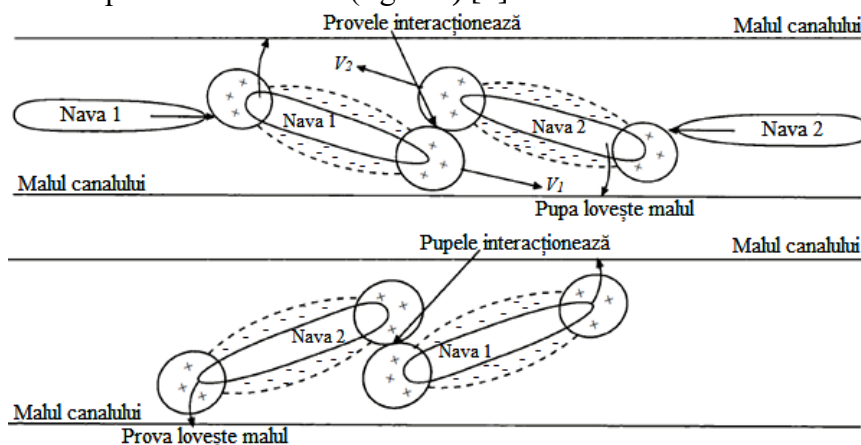


Fig. 4.2. Interacțiunea navă – navă într-un canal. Situația de întâlnire (prelucrare după Barrass [3])

4.1.3.2. Depășirea navelor într-un canal

Manevra de depășire trebuie făcută întotdeauna cu atenție sporită, deoarece viteza relativă este mică, iar navele sunt apropiate suficient timp pentru ca efectele interacțiunii să se manifeste. Ca urmare a acestei manevre poate rezulta coliziunea, ce poate fi evitată printr-o distanță suficientă între nave.

Interacțiunea navelor pe timpul depășirii depinde de viteza relativă; cu cât este mai redusă, cu atât efectele se manifestă pe o perioadă mai îndelungată. Dacă viteza relativă este zero, navele se deplasează în paralel, așa cum se întâmplă în cazul operațiunilor de realimentare pe mare efectuate de navele militare. În această situație efectele interacțiunii trebuie cunoscute pentru a găsi o poziție convenabilă pe timpul manevrei [3].

4.1.3.3. Interacțiunea navă – remorcher într-un canal

Pe timpul manevrelor în locuri înguste, un remorcher se poate găsi într-unul din următoarele cazuri:

- *Cazul 1:* Remorcherul se află în pupa navei asistate, în bordul babord. Domeniile de presiune ale navelor intră în contact și apare interacțiunea. Bulbul de presiune pozitivă al remorcherului este respins de bulbul de presiune pozitivă al navei asistate. Ambele nave abat spre babord.
- *Cazul 2:* Remorcherul se află la traversul navei asistate, în bordul babord, acesta fiind în pericol de a fi atras spre corpul navei datorită interacțiunii dintre câmpurile de presiune negativă. Forța de sucțiune laterală variază cu diferența de tonaj deadweight dintre cele două nave. Fiecare navă suferă o înclinare transversală.
- *Cazul 3:* Remorcherul se află în prova navei, în babord. Bulbii de presiune pozitivă se resping, iar navele abat la tribord. Remorcherul având o rată mai mare de întoarcere, există un real pericol ca acesta să fie atras pe direcția de deplasare a navei și să fie răsturnat.

4.1.3.4. Interacțiunea navă – navă acostată într-un canal

Efectele interacțiunii se pot manifesta și în cazul în care la manevra de depășire una dintre nave este în staționare, acostată de-a lungul unui cheu. Aceleași fenomene, forțe și momente apar între cele două nave, însă nava acostată se va mișca înainte sau înapoi de-a lungul cheului.

În general, viteza de trecere pe lângă navele acostate trebuie să fie redusă, iar în canale, unde rezerva de apă sub chilă este mică, aceasta trebuie scăzută până la limita la care nava mai poate guverna. De asemenea, distanța laterală față de navele acostate trebuie să fie suficient de mare pentru a permite o trecere în siguranță [3].

4.1.4. Interacțiunea navă – mal în canale

La navigația în canale sau șenale înguste, curgerea de-a lungul corpului navei devine foarte complexă și apar interacțiuni între navă și pereții canalului, datorită forțelor și momentelor hidrodinamice suplimentare generate de vecinătatea malurilor, influențând astfel mișcarea navei. Acest fenomen este denumit *efect de banc*.

În figura 4.3, se observă că nava este mai apropiată în pupa tribord de peretele canalului, în timp ce bordul babord este liber. Când aceasta trece de-a lungul canalului cu o viteză considerabilă, paralel cu malul, apa trece din zona proa unde spațiul este mai mare către pupa, unde zona este mai îngustă. Creșterea vitezei de curgere produce o scădere a presiunii în zona Z_s față de zona Z_p din babord. În consecință, presiunea apei din babord împinge pupa navei către malul canalului, producând o mișcare a proei navei către centrul canalului. Efectul de banc depinde de mulți parametri, cum ar fi forma malului, adâncimea apei, distanța navă – mal, dimensiunile navei, viteza navei și acțiunea propulsorului (elice). O estimare credibilă a efectului de banc este importantă pentru determinarea condițiilor limită în care o navă poate opera într-un canal.

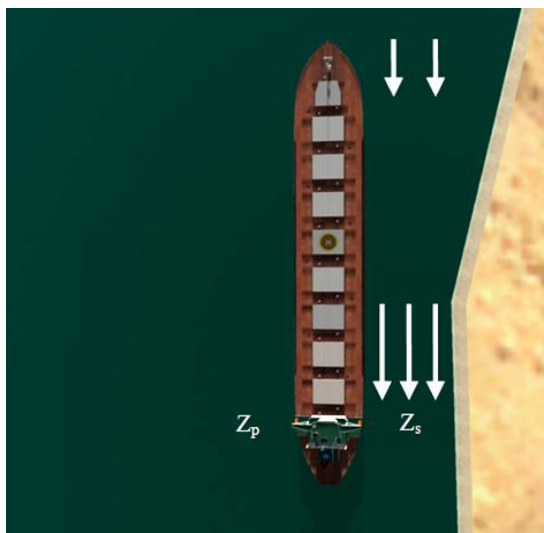


Fig. 4.3. Curgerea inegală a apei datorită inegalității malului

4.2. STUDIU DE CAZ PRIVIND INTERACȚIUNEA NAVĂ – NAVĂ UTILIZÂND SIMULATORUL DE NAVIGAȚIE NTPRO 5000

4.2.1. Condițiile inițiale ale situației simulate

Simularea interacțiunii navă – navă a fost efectuată cu ajutorul simulatorului de navigație și manevra navei NTPRO 5000. Deoarece interacțiunea navă – navă are un efect mai mare în zone cu adâncime și lățime limitate, s-a ales pentru simulare o porțiune din Canalul Suez, cu o lățime de 390 m.

Pentru simulare s-au utilizat un tanc petrolier și o navă de transport mărfuri în vrac (bulk carrier). Caracteristicile celor două nave sunt prezentate în tabelul 4.1.

Tabelul 4.1. Caracteristicile navelor

Caracteristică	Tanc petrolier	Bulk carrier
Deplasament [t]	77 100	104 510
Lungime [m]	242,8	250
Lățime [m]	32,2	43
Pescaj [m]	12,5	12,0
Viteza maximă [Nd]	15	14,8

În cadrul acestui studiu de caz s-a simulat manevra de întâlnire a navelor aflate pe drumuri paralele, dar de sensuri opuse. Distanța laterală dintre nave la momentul întâlnirii a fost de 50 m (fig. 4.4), iar viteza s-a considerat constantă.

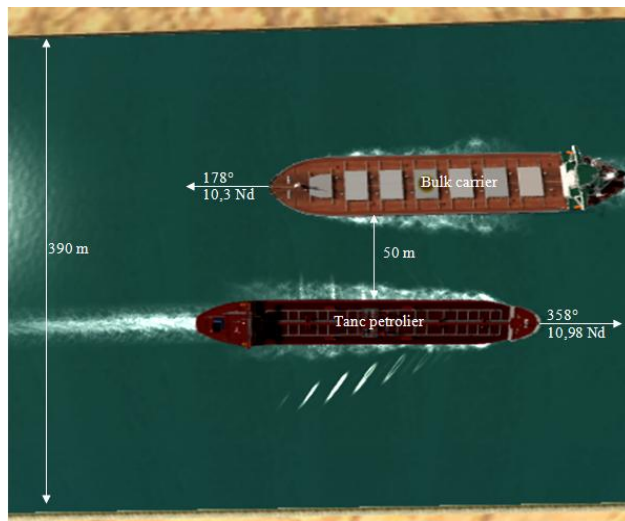


Fig. 4.4. Întâlnirea navelor pe canalul considerat

4.2.2. Rezultate obținute

Subiectul analizei parametrilor hidrodinamici, pe timpul manevrei de întâlnire, a fost tancul petrolier. În condiții statice, nava are un pescaj de 12,5 m, atât la prova, cât și la pupa, dar la deplasarea ei cu viteza de 10,98 noduri (5,63 m/s) prin canalul de mică adâncime, pescajul crește din cauza squatului, ajungând la 13,266 m la prova și 13,308 m la pupa. În momentul întâlnirii cu nava bulk carrier, se observă o creștere suplimentară a pescajului atât la prova, cât și la pupa.

În legătură directă cu interacțiunea dintre nave și efectul de squat a fost observată și o creștere a vitezei (fig. 4.5). Viteza navei are un trend ascendent asemănător cu cel al pescajului; după o scădere ușoară în momentul întâlnirii, viteza navei crește de la 10,953 noduri la 11,093 noduri. Viteza tancului petrolier continuă să crească după ce navele se îndepărtează, însă de această dată din cauza efectului de banc, deoarece nava a fost derivată la tribord, spre malul adiacent al canalului.

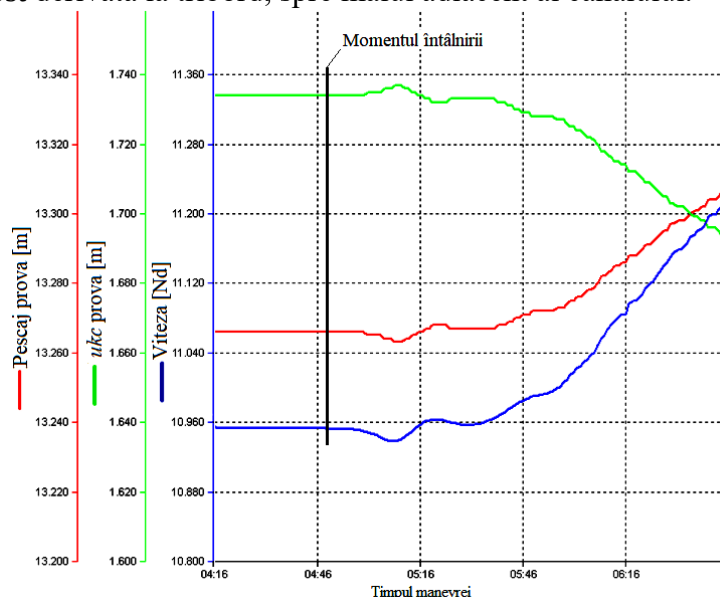


Fig. 4.5. Variația pescajului prova, a rezervei de apă sub chilă (*ukc*) și a vitezei pentru tancul petrolier, pe durata manevrei de întâlnire

În momentul apropierii, navele au tendința de a se respinge datorită bulbilor de presiune pozitivă din prova și fiecare se abate spre malul adiacent. Pe durata manevrei, momentul de pivotare resultant scade, pe măsură ce presiunea pozitivă din prova fiecărei nave produce o forță mai mică asupra celeilalte nave. În momentul în care pubele interacționează, tendința navelor este de a abate spre malul opus, însă momentul de pivotare are o valoare prea mică pentru a produce un efect vizibil asupra navelor.

4.3. STUDIU DE CAZ PRIVIND INTERACȚIUNEA NAVĂ – MAL ÎN CANALE UTILIZÂND SIMULATORUL DE NAVIGAȚIE NTPRO 5000

4.3.1. Condițiile inițiale ale situațiilor simulate

Studiul de caz asupra interacțiunii navă – mal folosind simulatorul de navigație NTPRO 5000 s-a efectuat pe un șenal navigabil de aproximativ 476 m lățime din Canalul Suez.

Principalii parametri în interacțiunea navă – mal sunt raporturile lățime – pescaj și lungime – lățime, distanța de la planul diametral la malul canalului y_{ch} , distanța de la unul din borduri la centrul canalului e_{ch} (fig. 4.6), unghiul între planul longitudinal al navei și peretele canalului, viteza navei V_K , dar și lățimea canalului B , adâncimea apei h sau unghiul de înclinare al peretelui canalului θ .

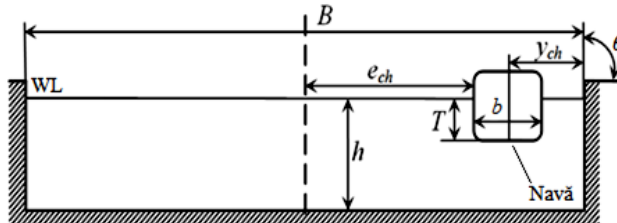


Fig. 4.6. Principalii parametri geometrici ce determină mișcarea navei într-un canal

Testele au fost efectuate pe o navă de transport mărfuri în vrac de 76 800 tone. Au fost efectuate treceri în linie dreaptă, prin canal, pe o distanță de o milă marină, la diferite viteze ale navei și pentru trei rezerve de apă sub chilă, 10, 35 și 50 % din pescajul static. Distanța de la planul diametral al navei la malul canalului, y_{ch} , a fost setată la 58 m.

Combinațiile dintre viteza navei V_K și raportul h/T sunt prezentate în tabelul 4.2. Încercările au fost realizate pentru viteze la scară reală de 6,2, 7,4, 10,3, 11,8 și 16 noduri.

Tabelul 4.2. Matricea condițiilor de testare

h/T \ V_K	6,2 Nd	7,4 Nd	10,3 Nd	11,8 Nd	16,0 Nd
1,10 ($ukc = 10 \% \cdot T$)	○	○	○	○	
1,35 ($ukc = 35 \% \cdot T$)		○			
1,50 ($ukc = 50 \% \cdot T$)		○			○

Adâncimea apei în zonă a fost considerată constantă pentru toate cele trei rezerve de apă sub chilă și setată astfel încât, ținând cont de pescajul navei, să fie îndeplinită condiția de apă de mică adâncime, pentru ca nava să fie afectată de fenomenul de squat.

4.3.2. Rezultate și discuții

Prima încercare s-a efectuat la o viteză de 6,2 noduri pentru o adâncime a apei de $1,1 \cdot T$. Pescajele navei, la prova și la pupa, sunt constante datorită adâncimii constante, dar valoarea maximă a acestora de 5,748 m la prova, respectiv 9,462 m la pupa, este mai mare decât pescajul static. Diferența dintre valorile pescajelor reprezintă squatul produs din cauza vitezei navei, rezervei mici de apă sub chilă și interacțiunii navă – mal.

În ceea ce privește parametrii hidrodinamici ai navei când aceasta se deplasează de-a lungul cheului, au fost luate în considerare forțele laterale și longitudinale ce acționează asupra carenei, momentul de pivotare în jurul axei verticale și abaterea laterală.

Traectoria navei în cadrul acestui test și poziția finală pot fi observate în figura 4.7.

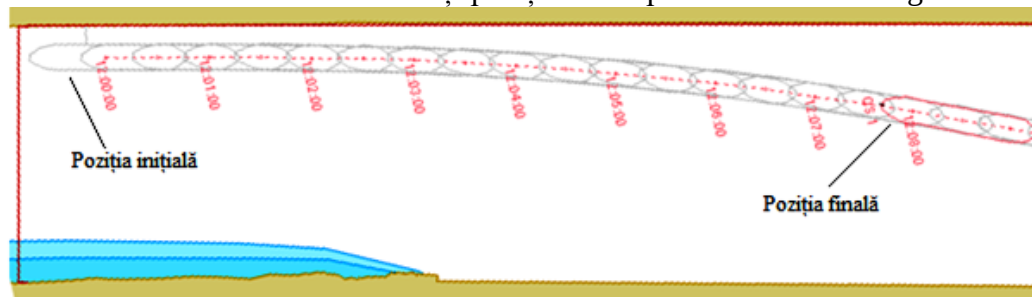


Fig. 4.7. Traectoria navei prin canal la viteza de 6,2 noduri

Pentru a doua viteză considerată de 7,4 noduri, au fost executate încercări pentru toate cele trei rezerve de apă sub chilă. Studiind traiectoria navei la această viteză pentru toate adâncimile considerate,

s-a observat că nu există diferențe notabile între acestea. Figura 4.8 arată traiectoria navei valabilă pentru toate cele trei cazuri și se poate concluziona că adâncimea apei are un efect redus asupra distanței finale navă – mal, în comparație cu efectul vitezei navei, care produce creșterea de pescaj. În comparație cu prima situație (fig. 4.7), distanța finală navă – mal este mai mare la sfârșitul exercițiului, ceea ce înseamnă că la viteze mai mari ale navei efectul de banc este mai pronunțat, astfel împingând nava mai mult către malul opus al canalului.

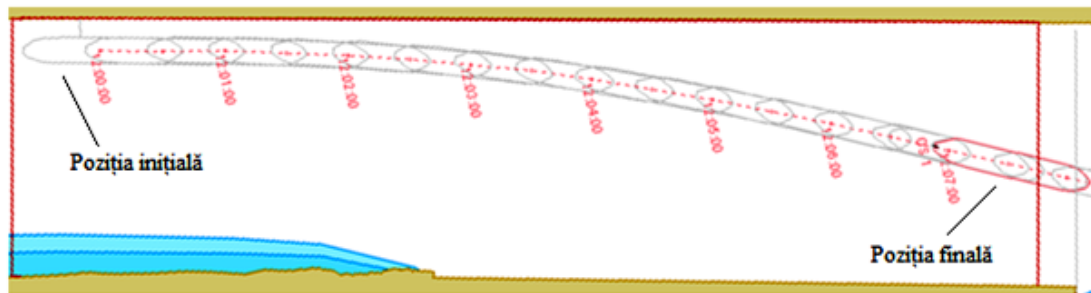


Fig. 4.8. Traiectoria navei prin canal la viteza de 7,4 noduri

Pentru a treia viteză considerată (10,3 noduri) pescajele maxime sunt 5,927 m la prova și 9,701 m la pupa datorită rezervei mici de apă sub chilă și a prezenței malului. Pe măsură ce distanța navă – mal crește, pescajul începe să scadă ușor. La această viteză, nava trebuie să acorde o atenție deosebită rezervei de apă sub chilă de 0,5 m la pupa. La viteza de 11,8 noduri, pescajul prova este de 6,046 m și 9,86 m la pupa, în timp ce rezerva de apă sub chilă este de 4,154 m la prova și de numai 0,34 m la pupa.

Pentru viteza de 16 noduri, pescajul crește la o valoare maximă de 5,987 m la prova și 9,995 m la pupa, însă deoarece adâncimea apei este de $1,5 \cdot T$, rezerva de apă sub chilă de 3,9 m la pupa și 7,97 m la prova este sigură pentru tranzitarea canalului. Se observă o ușoară scădere a pescajului, atât la prova cât și la pupa, dar spre finalul simulării, când nava se apropie de malul opus al canalului, acesta suferă o creștere bruscă.

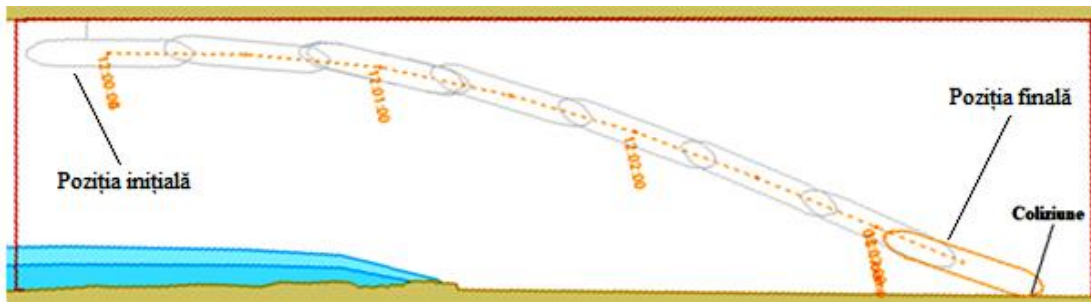


Fig. 4.9. Traiectoria navei prin canal la viteza de 16 noduri

Traiectoria navei și poziția sa finală după coliziunea cu malul opus poate fi observată în figura 4.9. Se constată că, față de situațiile studiate anterior, nava începe să se distanțeze de malul adiacent mult mai devreme din cauza vitezei mai mari, iar efectul de pernă este mai puternic ce face ca traiectoria navei să fie deviată spre malul opus, unde se produce coliziunea, de data aceasta până la limita de o milă marină a canalului.

CAPITOLUL 5

CERCETĂRI EXPERIMENTALE LA BORDUL NAVEI ȘCOALĂ "MIRCEA"

5.1. NAVA ȘCOALĂ "MIRCEA". CARACTERISTICI TEHNICE

Nava școală "MIRCEA" este un velier clasa A, tip bark, cu trei arbori, înaltă de 44 de metri, cu 23 de vele ce însumează o suprafață velică totală de 1750 m².

În continuare sunt prezentate caracteristicile constructive și tehnice ale navei, astfel:

- **Tipul navei:** nava este de tip navă școală, cu vele, având și posibilitatea de propulsie mecanică cu ajutorul unei elice cu pas reglabil antrenată de către motor.

- **Corpul** este realizat în întregime din metal. Forma corpului este de velier, cu chilă metalică masivă. Nava este prevăzută cu balast¹⁷ solid.
- **Lungime maximă:** 81,60 m
- **Lungimea între perpendiculare:** 62,00 m
- **Lățimea maximă la cuplul maestru¹⁸:** 12,00 m
- **Înălțimea de construcție:** 7,300 m
- **Pescajul de calcul măsurat la marginea inferioară a chilei:** 5,350 m
- **Coeficientul de finețe bloc la plutirea de calcul** (raportat la L_{pp}): 0,473
- **Viteză maximă cu motor:** 9,5 Nd [35].

5.2. CERCETĂRI EXPERIMENTALE LA BORDUL NAVEI ȘCOALĂ "MIRCEA"

5.2.1. Marșul de instrucție al navei școală "MIRCEA" – 2015

În perioada 01.07.2015 – 10.08.2015, nava școală "MIRCEA" a efectuat un voiaj internațional de instrucție cu studenții Academiei Navale și elevii Școlii Militare de Maiștri Militari a Forțelor Navale "Amiral Ion Murgescu", cu plecare din portul Constanța și escale în porturile Civitavecchia (Italia), Barcelona (Spania), Marsilia (Franța) și Bar (Muntenegro).

În cadrul acestui voiaj autorul prezentei teze a îndeplinit funcția de instructor de practică și de ofițer de cart. Cu această ocazie a realizat o serie de măsurători asupra pescajului navei, adâncimii apei sub chilă și a vitezei navei, în momentul intrării și ieșirii acesteia în/din porturile menționate, deoarece aceste zone prezentau, mai mult sau mai puțin, caracteristicile unor zone restrictive (apă puțin adâncă și/sau limitată în lățime) ce puteau favoriza apariția fenomenului de squat.

5.2.2. Descrierea metodelor de măsurare

În cadrul acvatoriului portuar, pe durata manevrei de intrare a navei în port până în momentul manevrei de acostare la cheu și pe durata manevrei de plecare de la cheu până în momentul ieșirii navei din port, s-au efectuat măsurători asupra mărimilor strâns legate de fenomenul de squat: pescajul navei, adâncimea sub chilă și viteza.

La bord, pescajul navei se determină prin citirea directă a scărilor de pescaj aflate pe bordaj la pupa (fig. 5.1) sau la prova navei.



Fig. 5.1. Scara de pescaj pupa

De regulă, citirea pescajelor se face înainte ca nava să plece de la cheu prin observare directă de pe mal. Atunci când nava se află în marș, pescajul prova poate fi citit de la bord de pe puntea teugă¹⁹, dar pescajul pupa nu se poate citi deoarece scara de pescaj nu este vizibilă de pe puntea duneții²⁰. Pentru a elimina această problemă s-a utilizat o cameră video HD Midland XTC 200 720p pentru a înregistra variația pescajului pupa, montată pe o tijă de prelungire din lemn cu lungimea de 4 m (fig. 5.2), fixată de balustrada punții duneții, în dreptul scării de pescaj.

¹⁷ balast – termen naval care desemnează o serie de materiale grele sau apă de mare în tancurile de balast, încărcate pe o navă, în anumite împrejurări, cu scopul de a-i îmbunătăți condițiile de navigabilitate

¹⁸ cuplu maestru – secțiunea transversală verticală care trece prin punctul unde nava are lățimea maximă

¹⁹ teugă – punte deasupra punții principale, la prova, care se întinde dintr-un bord în altul și în interiorul căreia sunt amenajate magazine și, uneori, locuințe pentru echipaj

²⁰ duneții – punte deasupra punții principale, la pupa, care se întinde pe toată lățimea navei

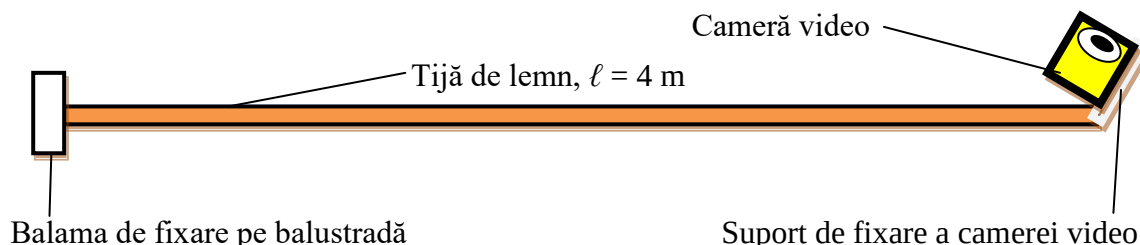


Fig. 5.2. Tija de prelungere

În același timp au fost preluate date despre adâncimea apei sub chilă a zonei tranzitate de la sonda ultrason²¹ Sperry ES 5000 cu care este dotată nava. Aceasta măsoară cu acuratețe adâncimi în ape mici sau mari, având 4 scări de operare de la 10 m la 2000 m și le afișează sub forma unui grafic al adâncimii fundului mării pe un display de tip LCD. Pentru înregistrarea continuă a adâncimii, sonda oferă posibilitatea imprimării graficului de adâncime pe hârtie. Astfel, a fost extrasă adâncimea apei sub chilă din grafic, pentru diferite momente de timp, care a fost corelată cu pescajul înregistrat cu ajutorul camerei video.

Poziția navei, drumul și viteza au fost preluate în format electronic de la sistemul de hărți electronice, ce primește aceste informații de la receptorul GPS.

5.2.3. Prelucrarea datelor obținute

În urma măsurătorilor din fiecare port, a studierii filmărilor video și a extragerii datelor de adâncime, prin corelarea acestora în funcție de timp, s-au obținut informații pe baza cărora s-au făcut analize.

La manevrele de intrare în port, momentul inițial t pentru extragerea datelor se consideră pentru fiecare caz, momentul în care nava a dublat farul de intrare în port, iar sfârșitul perioadei de măsurare se consideră atunci când nava are o viteză de 3 noduri.

La manevrele de ieșire din port, momentul inițial se consideră atunci când nava depășește viteza de 3 noduri, iar sfârșitul perioadei, atunci când nava dublează farul de intrare pe sensul de ieșire din port. Extragerea datelor s-a făcut la intervale de 30 de secunde.

5.3. REZULTATE OBȚINUTE

5.3.1. Portul Civitavecchia, Italia

În conformitate cu recomandările Comitetului de Manevrabilitate ITTC²² [35], condiția de adâncime mică este realizată dacă raportul dintre adâncimea apei h și pescajul mediu al navei T îndeplinește condiția $1,2 < h/T < 1,5$. Dacă $h/T < 1,2$, atunci nava se află în ape de adâncime foarte mică.

La intrarea în portul Civitavecchia s-au măsurat adâncimea apei sub chilă – obținută de la sonda ultrason a navei, pescajul pupa – obținut din înregistrarea video, iar pescajul prova prin observare directă. La manevra de intrare, valorile acestui raport variază între 2,68 și 4,27, deci nu se încadrează în limitele necesare pentru a îndeplini condiția de adâncime mică prezentată mai sus, astfel încât calcularea squatului navei nu are sens.

Lățimea de influență F_B pentru nava școală “MIRCEA” este de 215,83 m. Totuși, nava se deplasează pe centrul șenalului navigabil, atât la intrarea în port cât și la ieșire, astfel încât limitele lățimii de influență, nu sunt încălcate de diguri sau dane și astfel nu este influențată deplasarea navei. La ieșirea din portul Civitavecchia situația este similară deoarece valorile raportului h/T variază între 2,58 și 4,27, deci squatul nu se produce.

5.3.2. Portul Barcelona, Spania

La intrarea în portul Barcelona s-au făcut aceleași măsurători ca în cazul precedent. Pescajul mediu al navei calculat a fost de 5,325 m, deoarece pescajul prova a fost în mod constant de 5,3 m, iar pescajul pupa a variat între 5,3 și 5,35 m. Se observă că, la manevra de intrare, raportului h/T variază între 2,31 și 4,66, deci nu se încadrează în limitele necesare pentru a îndeplini condiția de adâncime mică prezentată mai sus.

În acest caz, lățimea de influență F_B este de 216,42 m. Deși, nava se deplasează pe centrul șenalului navigabil, limitele lățimii de influență sunt încălcate, pe alocuri, de digurile sau danele din port, însă datorită faptului că viteza medie a navei la intrare este de 3,74 noduri, iar la ieșire de 4,24 noduri,

²¹ sondă ultrason – aparat de navigație maritimă destinat măsurării adâncimii apei (sub chila navei), folosind ultrasunete

²² International Towing Tank Conference

viteze foarte reduse, deplasarea navei nu este influențată de prezența obstacolelor, iar squatul nu se produce. La ieșirea din portul Barcelona situația este similară deoarece valorile raportului h/T variază între 1,995 și 3,12.

5.3.3. Portul Marsilia, Franța

La intrarea în portul Marsilia s-au făcut aceleași măsurători ca în cazurile precedente. La manevra de intrare, pescajul mediu al navei calculat a fost de 5,3 m, deoarece pescajele prova și pupa au fost în mod constant de 5,3 m. La manevra de ieșire din port, pescajul mediu al navei a fost de 5,35 m, deoarece pescajul prova a fost constant de 5,3 m, iar pescajul pupa a variat între 5,35 și 5,5 m. Astfel, la fiecare interval de timp, s-au calculat adâncimea apei h și raportul h/T . Se observă că, la manevra de intrare, valorile acestui raport variază între 2,339 și 2,905, deci nu se încadrează în limitele necesare pentru a îndeplini condiția de adâncime mică prezentată mai sus.

În acest caz, lățimea de influență F_B este de 217 m. Limita din tribord a lățimii de influență este încălcată, pe o porțiune mică, de digul de intrare, însă datorită faptului că viteza medie a navei la intrare este de 3,82 noduri, iar la ieșire de 4,67 noduri, viteze foarte reduse, deplasarea navei nu este influențată de prezența acestui obstacol, iar squatul nu se produce. La ieșirea din portul Marsilia situația este similară deoarece valorile raportului h/T variază între 2,23 și 4,31.

5.3.4. Portul Bar, Muntenegru

La intrarea în portul Bar s-au făcut aceleași măsurători ca în cazurile precedente. Pescajul mediu al navei calculat a fost de 5,325 m, deoarece pescajul prova a fost în mod constant de 5,3 m, iar pescajul pupa a variat între 5,3 și 5,35 m. La manevra de intrare, valorile raportului h/T variază între 2,99 și 3,62, deci nu se încadrează în limitele necesare pentru a îndeplini condiția de adâncime mică prezentată anterior.

În acest caz, lățimea de influență F_B este de 216,41 m. Limita din babord a lățimii de influență este încălcată, pe o porțiune mică, de digul de intrare, însă datorită faptului că viteza medie a navei la intrare este de 3,44 noduri, iar la ieșire de 4,04 noduri, viteze foarte reduse, deplasarea navei nu este influențată de prezența acestui obstacol, iar squatul nu se produce. La ieșirea din portul Bar situația este similară deoarece valorile raportului h/T variază între 2,427 și 3,14, deci squatul nu se produce.

Drumul navei pe harta electronică, pe timpul înregistrării datelor, este prezentat în figurile 5.3.a, b, pentru manevra de intrare. Distanța totală parcursă între cele două momente este de 531 m, la manevra de intrare, timp în care viteza navei a atins un maxim de 3,8 noduri.

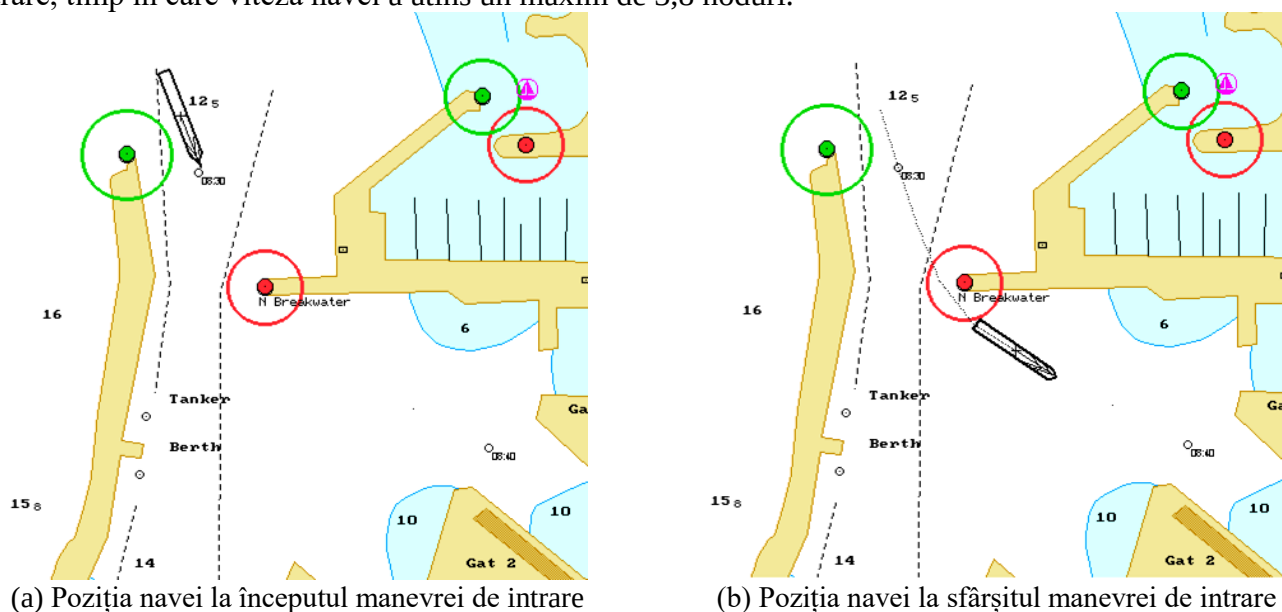


Fig. 5.3. Manevra de intrare în portul Bar

5.4. CONCLUZII

În urma măsurătorilor efectuate și interpretării rezultatelor s-au extras următoarele concluzii:

- Singura modalitate la bordul navei de a măsura pescajul este prin observare directă a scărilor de pescaj. De aceea, pentru citirea pescajului pupa, care este mai greu de citit, s-a folosit o cameră video și o tijă de prelungire pentru înregistrarea variației pescajului și vizionarea ulterioară a acestuia.

- În ceea ce privește metodele de măsurare folosite, s-a identificat la bord și apoi, la interpretarea datelor obținute, o dificultate a sincronizării în timp a filmărilor pescajului cu graficul adâncimii obținut de la sonda ultrasun și viteza navei obținută de la sistemul de hărți electronice, datorită faptului că aceste informații provin de la echipamente de navigație diferite cu ceasuri interne decalate.
- Încercările de a surprinde pe filmările realizate modificarea sesizabilă a pescajului, din cauza producerii squat-ului, s-au dovedit fără succes datorită mai multor aspecte:
 - în primul rând, parametrii geometrici ai navei școală "MIRCEA", cum ar fi lungimea, lățimea, pescajul, dar în special coeficientul de finețe bloc, nu sunt potrivite pentru efectuarea acestor experimente, deoarece valorile lor sunt prea mici pentru ca squatul să se producă, având în vedere vitezele cu care s-a deplasat nava la manevrele de intrare/ieșire în/din port.
 - în al doilea rând, pentru o navă cu aceste dimensiuni, squatul s-ar produce și ar fi vizibil pe scara de pescaj dacă viteza de deplasare depășește 10 noduri, însă nava școală "MIRCEA" poate dezvolta o viteză maximă de 9,5 noduri, iar în porturi la manevrele de intrare/ieșire viteza maximă a fost de 6,9 noduri. În aceste condiții squatul nu a fost observat pe nicio filmare făcută.
 - caracteristicile porturilor nu au fost suficient de restrictive pentru această navă, astfel încât să ducă la apariția squatului.
- Adâncimea apei în porturile tranzitate, precum și lățimea șenalului navigabil au fost variabile, iar apariția fenomenului de squat îngreunată și observarea acestuia imposibilă.
- Un alt element determinant asupra fenomenului de squat a fost și viteza variabilă a navei. Timpul în care nava a avut viteză constantă nu a fost suficient pentru ca squatul să se producă și să fie vizibil.

CAPITOLUL 6

SIMULAREA NUMERICĂ A EFECTELOR ADÂNCIMII LIMITATE ASUPRA CORPULUI NAVEI ȘCOALĂ "MIRCEA"

6.1. INTRODUCERE

Studiul prezentat în această lucrare urmărește procesul și selecția unor metode corespunzătoare pentru crearea modelului geometric, setarea modelului matematic și crearea preliminară a simulării CFD cu programul ANSYS CFX, care folosește solverul 3D pe baza metodei volumelor finite (Finite Volume Method).

Având la dispoziție planul de forme al navei școală "MIRCEA", s-a modelat geometric carena navei până la plutirea de 7 m, după care s-a definit domeniul de fluid pentru a studia efectele produse de adâncime asupra corpului. Aceste efecte se referă în principal la variația presiunii, vitezelor, forțelor și momentelor pe corp.

6.2. GEOMETRIA CORPULUI

Primul pas al simulărilor CFD este pregătirea geometriei CAD a carenei, care este descrisă în continuare. Construcția geometriei este făcută pe baza datelor din tabelul 6.1. Forma finală 3D a carenei navei școală "MIRCEA" folosită pentru analiză este arătată în figura 6.3.

Tabelul 6.1. Particularități ale geometriei carenei

Parametru	U.M.	Dimensiune
Lungimea la linia de plutire	L_{wl} [m]	62,061
Lățimea maximă la linia de plutire	B_{wl} [m]	12,00
Înălțimea de construcție	D [m]	7,00
Pescajul	T [m]	5,35
Deplasamentul	Δ [t]	1984,2
Coeficientul de finețe bloc	C_B	0,486

Mediul în care nava se deplasează este cunoscut sub numele de domeniu. A fost creat un domeniu destul de larg pentru a evita ca limitele domeniului să afecteze curgerea de-a lungul carenei. Dimensiunile domeniului (lungime, lățime, adâncime) din jurul navei sunt prezentate în figura 6.1 și sunt exprimate în funcție de lungimea la linia de plutire a carenei, L_{wl} . Aceste dimensiuni sunt în concordanță cu recomandările minime ale International Towing Tank Conference (ITTC).

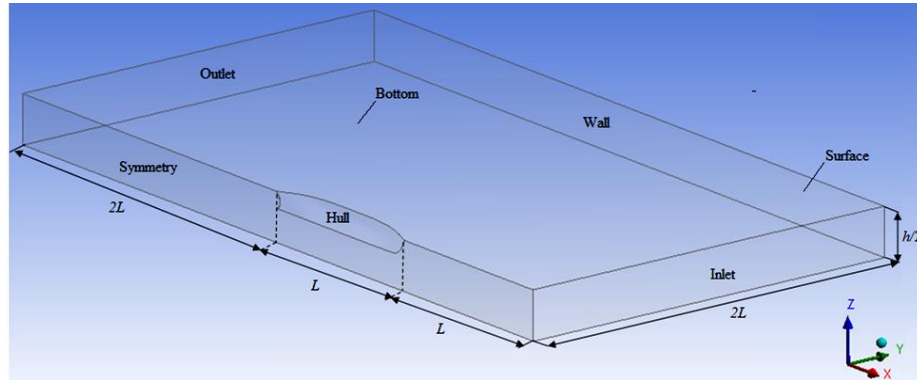


Fig. 6.1. Dimensiunile domeniului de fluid

Simulările s-au efectuat pe diferite domenii cu adâncime variabilă și cu viteze cuprinse între 2 și 8 noduri (fig. 6.2). Toate configurațiile de adâncime și viteză ale testelor efectuate sunt prezentate în tabelul 6.2. Cele 22 de cazuri simulate pornesc de la condiții de adâncime extrem de mică ($h/T = 1,1$) și până la o adâncime rezonabilă, dar considerată tot mică ($h/T = 3,0$).

Tabelul 6.2. Matricea simulărilor efectuate

$h/T \backslash V_K$	2 Nd	4 Nd	6 Nd	8 Nd
$h/T = 1,1$	○	○	○	
$h/T = 1,2$	○	○	○	
$h/T = 1,5$	○	○	○	○
$h/T = 2,0$	○	○	○	○
$h/T = 2,5$	○	○	○	○
$h/T = 3,0$	○	○	○	○

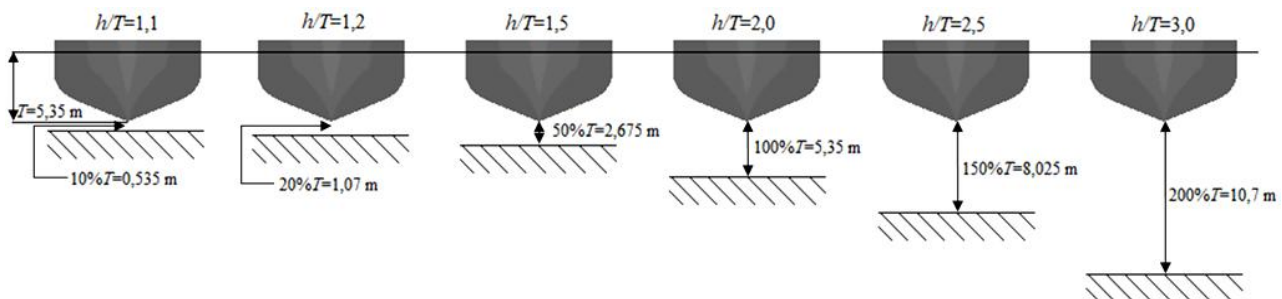


Fig. 6.2. Configurațiile de adâncimi simulate

Etapele de construcție a geometriei carenei au fost următoarele:

1. Crearea unor curbe 3D definite cu ajutorul punctelor din fișierul cu coordonate;
2. Generarea unei suprafețe care unește aceste curbe cu funcția Skin/Loft;
3. Dublarea suprafeței create față de planul XZ pentru a genera și bordul tribord folosind funcția Mirror;
4. Generarea unei suprafețe plane la pescajul de 7 m pentru a închide corpul;
5. Crearea unui nou sistem de coordonate traslatat pe axa Z la $-5,35$ m, pentru a deplasa corpul la această cotă astfel încât să se obțină corpul imers la pescajul considerat (fig. 6.3);
6. Înscrierea corpului folosind funcția Enclosure într-un paralelipiped dreptunghic care se extinde o lungime de navă de la prova, două lungimi spre pupa, două lungimi în fiecare bord și în jos de la linia de bază cu o valoare corespunzătoare fiecărei adâncimi considerate. Acest paralelipiped reprezintă domeniul de fluid;
7. Extragerea corpului navei din acest domeniu folosind funcția Boolean – Subtract;

8. Tăierea corpului navei la nivelul noului plan și ștergerea părții emerse, de la plutirea de 5,35 m la 7 m;
9. Tăierea domeniului de-a lungul planului diametral OXZ , cu ajutorul funcției Symmetry;
10. Crearea fețelor domeniului folosind funcția Named Selection, astfel: Inlet, Outlet, Surface, Bottom, Wall, Hull, Symmetry (fig. 6.1).

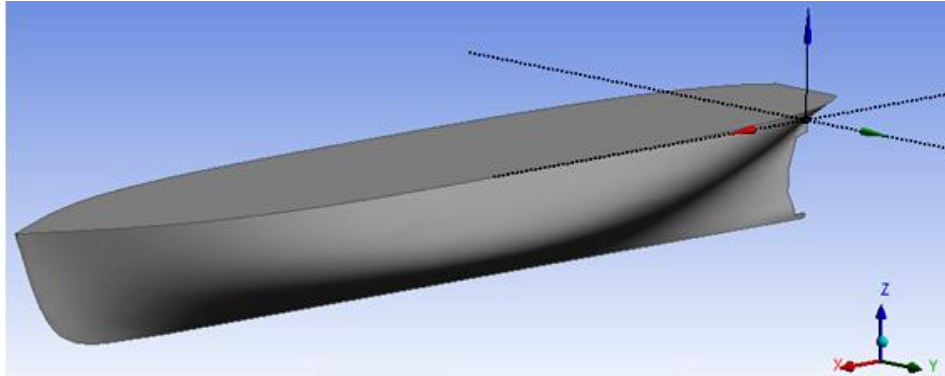


Fig. 6.3. Translatarea corpului pe verticală

6.3. GENERAREA REȚELEI DE NODURI

Împărțirea domeniului computațional într-un număr de celule este denumit rețea. Trebuie dată o atenție deosebită creării rețelei, deoarece o calitate slabă a acesteia are un efect negativ asupra convergenței soluției și încrederii în rezultatele calculate. Figura 6.4 prezintă rețeaua de celule obținută pentru domeniul de fluid într-unul din cazurile studiate.

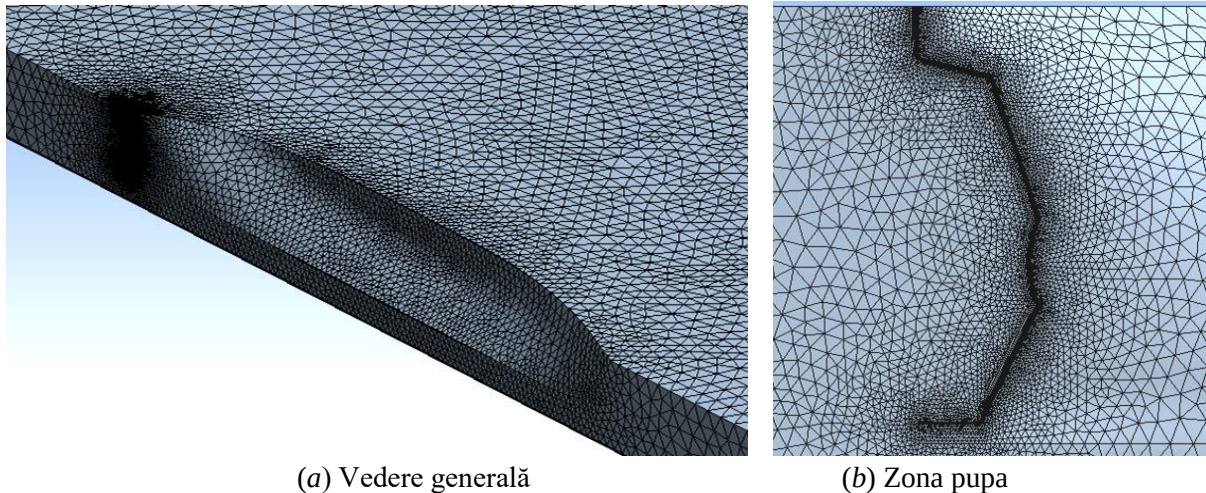


Fig. 6.4. Rețeaua de celule

Pentru a observa fenomenul curgerii în simulări, densitatea rețelei de noduri a fost mai concentrată în anumite regiuni ale domeniului. În acest sens, s-a folosit o rețea fină pe suprafața caranei și au fost create straturi de celule de-a lungul acesteia pentru a rezolva curgerea în stratul limită. Straturile de celule au fost construite astfel încât grosimea totală să corespundă cu grosimea estimată a stratului limită, iar înălțimea primului strat de celule a fost stabilită pentru a obține o valoare corespunzătoare a parametrului y^+ (prezentat în subcapitolul 6.4.5).

6.3.1. Studiu privind sensibilitatea rețelei de noduri

Pentru a stabili acuratețea soluției CFD și pentru a menține scăzut efortul computațional s-a realizat un studiu asupra sensibilității rețelei de noduri. S-a ales cazul $h/T = 2,5$ cu viteza $V_K = 8$ Nd, modelul de turbulență $k-\omega$ SST²³. Studiul a fost efectuat generând trei mesh-uri diferite, unul brut, unul mediu și unul fin pentru a determina cum afectează calitatea rețelei de noduri rezultatele simulării. Numărul de noduri, durata simulărilor și forțele totale ce acționează pe carană în direcția X și Z pentru cazul ales sunt prezentate în tabelul 6.3. La toate cele trei rețele, valoarea parametrului y^+ se menține la valoarea 60 pe suprafața carenei, diferența dintre acestea fiind doar numărul de noduri.

²³ shear stress transport

Tabelul 6.3. Caracteristicile rețelelor de noduri pentru cazul $h/T = 2,5$, $V_K = 8 \text{ Nd}$

Rezoluție mesh	Mesh brut (M1)	Mesh mediu (M2)	Mesh fin (M3)
Număr de noduri	866 835	1 078 354	1 458 185
Durata simulării CFD	08h 17min	14h 53min	23h 51min
Forța totală X pe carenă	– 1,0408e+04	– 1,0339e+04	– 1,0120e+04
Forța totală Z pe carenă	– 2,8221e+05	– 2,8216e+05	– 2,8176e+05

Valoarea forței totale ce acționează pe carena navei pe direcția X devine din ce în ce mai mică pe măsură ce rețeaua de noduri devine mai rafinată, obținându-se valoarea – 10 120 N pentru rețeaua M3. Diferența între valorile obținute cu rețelele de noduri M1 și M2 este de aproximativ 2 %, dar timpul total al simulărilor CFD diferă semnificativ de la o rețea la alta. În același timp, valoarea forței totale ce acționează pe carena navei pe direcția Z are o valoare maximă de – 281 760 N, obținută cu rețeaua M3, însă diferențele între celelalte valori obținute este de sub 1 %. Datorită diferențelor mici și luând în considerare timpul de calcul, s-a ajuns la concluzia că rețeaua de noduri medie M2 este cea mai potrivită și oferă rezultate bune, cu un cost computațional rezonabil.

6.4. MODELUL MATEMATIC

6.4.1. Ecuațiile de guvernare ale modelului matematic

La derivarea ecuațiilor mișcării unui fluid, trebuie cunoscute rata de schimb a proprietăților fluidului φ pe unitate de masă și pe unitate de volum. Acest domeniu este descris complet de densitatea ρ , viteza U , presiunea p și vâscozitatea ν . Folosind metoda lui Euler se va investiga câmpul de fluid $\varphi(x, y, z, t)$ presupunând că proprietățile care interesează sunt în funcție de poziția particulei de fluid și timp. La un moment dat de timp t , particula de fluid se află în punctul de coordonate (x, y, z) , iar după un moment de timp $t + \Delta t$ aceasta s-a deplasat într-un alt punct de coordonate $(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z)$.

6.4.2. Ecuațiile Navier-Stokes pentru conservarea momentului

Tensiunile vâscoase din ecuațiile momentului pot fi legate de ratele deformării liniare ale elementului de fluid, acestea fiind exprimate prin componentele vitezei. Pentru un fluid newtonian izotrop, relația dintre tensiuni și rata deformațiilor este dată de tensorul tensiunilor [18]

$$\Rightarrow \mathfrak{T} = \begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \tau_{yy} & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \tau_{zz} \end{pmatrix}. \quad (6.1)$$

6.4.3. Conceptul de modelare a turbulențelor

Mișcarea unui fluid vâscos este guvernată de ecuațiile Navier-Stokes, care sunt valabile atât pentru curgerea turbulentă cât și pentru cea laminară. Modelarea numerică a turbulenței reprezintă o sarcină foarte dificilă care presupune înțelegerea profundă a fizicii curgerilor turbulente și o cunoaștere extensivă a metodelor matematice.

În această lucrare, curgerea vâscoasă de-a lungul carenei navei școală "MIRCEA" se presupune a fi incompresibilă, iar problema numerică este descrisă de ecuațiile RANS²⁴.

6.4.4. Modelul de turbulență $k-\omega$

Modelul $k-\omega$ are avantajul că este valid atât în zone apropiate de pereți, cât și în regiuni cu turbulență scăzută, ceea ce înseamnă că ecuațiile de transport pot fi folosite pe întreg domeniul de curgere. Un dezavantaj al acestui model este că rezultatele sunt sensibile la alegerea condițiilor la limită și a condițiilor inițiale.

Pentru a folosi împreună avantajele modelelor $k-\varepsilon$ și $k-\omega$, Menter (1994) a dezvoltat modelul cu transportul tensiunilor tangențiale (SST), combinând cele două modele într-unul singur folosind funcții de amestec. În acest model hibrid, modelul $k-\omega$, este folosit la curgerea în stratul limită, în timp ce modelul $k-\varepsilon$, definit sub forma $k-\omega$, este folosit în curgerea liberă. Modelul este recunoscut pentru performanțe bune și este cel mai des utilizat model de turbulență pentru simulări în hidrodinamică navală [25].

6.4.5. Stratul limită

Pentru a caracteriza curgerea în apropierea peretelui, deseori se introduce o mărime adimensională ce măsoară distanța la perete. Aceasta este definită prin relația

²⁴ Reynolds averaged Navier-Stokes

$$y^+ = \frac{u_* \cdot y}{\nu}, \quad (6.2) [23]$$

unde y este distanța până la perete și u_* – viteza de frecare. Viteza de frecare este

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}, \quad (6.3) [23]$$

unde τ_w este tensiunea tangențială la perete,

$$\tau_w = \rho \nu \left. \frac{\partial U}{\partial y} \right|_{y=0}. \quad (6.4) [23]$$

În stratul limită, gradientii variabilelor curgerii pe direcția normală pe perete sunt în general foarte mari în comparație cu cei din curgerea liberă. Acest lucru implică faptul că este necesară o rezoluție spațială mai mare pentru ca soluția metodei să surprindă efectele din apropierea peretelui. O metodă alternativă obișnuită folosită pentru a împiedica cerințele unei rezoluții spațiale mari este folosirea funcțiilor perete, ce sunt modele empirice folosite pentru a estima variabilele curgerii în apropierea pereților.

6.4.6. Criteriul de convergență

Pentru a decide dacă o soluție a ajuns la nivelul dorit de convergență este util să se monitorizeze rezidualele variabilelor curgerii pentru fiecare iterație. În cadrul simulărilor CFD s-au folosit rezidualele de tip RMS²⁵ cu o valoare țintă de 10^{-5} , ce reprezintă o convergență bună și este suficientă pentru majoritatea aplicațiilor ingineresti [34].

6.5. CONDIȚIILE LA LIMITĂ

Simulările s-au efectuat pentru 6 valori ale adâncimii apei și 4 valori ale vitezei navei, iar modelarea a inclus următoarele supoziții și simplificări:

- curgere omogenă a fluidului incompresibil;
- mișcare liniară cu viteză constantă;
- suprafață liberă, fără valuri și curenți;
- lățimea domeniului egală cu patru lungimi de navă pentru a elimina efectul de perete;
- nava se consideră pe asietă dreaptă, fără influența cârmei sau a elicei;
- suprafața carenei este perfect fină;
- fund drept fără denivelări naturale;
- datorită simetriei curgerii, calculele au fost efectuate pentru jumătate din domeniu;
- modelarea geometrică a navei s-a făcut la scară naturală;
- curgerea fluidului s-a desfășurat într-un domeniu rectangular în jurul carenei navei (fig. 6.5).

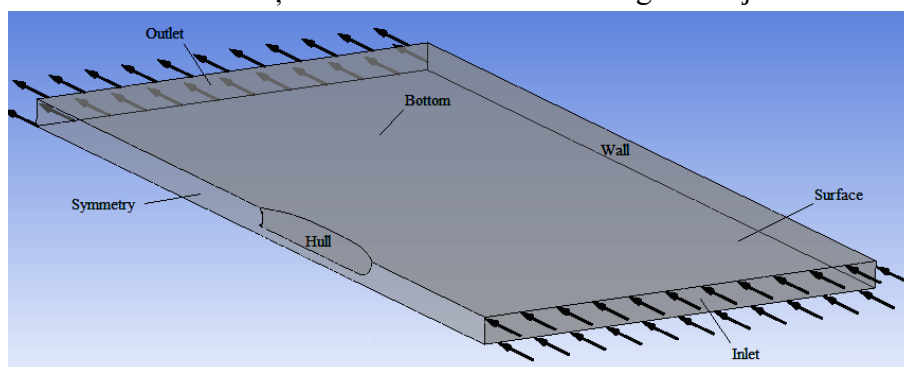


Fig. 6.5. Fețele domeniului de fluid

Limitele domeniului computațional sunt ilustrate în figura 6.5, condițiile la limită ale acestora fiind definite în cele ce urmează.

Condiția impusă la limita de intrare a domeniului a fost de tipul *inlet*, iar viteza fluidului a corespuns cu viteza carenei pentru fiecare simulare în parte. Vitezele pentru care s-au făcut simulări au fost de 2 Nd (1,029 m/s), 4 Nd (2,058 m/s), 6 Nd (3,087 m/s) și 8 Nd (4,116 m/s). Variabilele curgerii turbulente au fost definite specificând valoarea pentru intensitatea turbulentă și raportul vâscozității

²⁵ root mean square

turbulente. Condiția impusă la limita de ieșire a domeniului a fost de tipul *outlet*, cu opțiunea *Average Static Pressure* și presiunea relativă 0 Pa. Condiția impusă pe fundul domeniului (bottom) a fost de tipul *no slip wall*. S-a considerat că fundul domeniului se deplasează cu viteza de deplasarea a navei, dar în sens invers, iar pentru aceasta s-a introdus opțiunea *Wall Velocity*. Pe carena navei (hull) a fost definită condiția la limită de perete staționar, fără alunecare (*no slip wall, stationary*), iar la suprafața domeniului și la limita laterală, condiția *free slip wall*. Planul de simetrie a fost setat cu condiția la limită *symmetry*.

6.6. REZOLVAREA ȘI REZULTATELE SIMULĂRIILOR

6.6.1. Rezolvarea modelului

Calculul au fost efectuate cu solverul ANSYS CFX. Curgerea turbulentă a fost simulată prin rezolvarea ecuațiilor Navier-Stokes mediate Reynolds (RANS) pentru curgerea incompresibilă.

Timpul total alocat simulărilor a fost calculat astfel încât o particulă de fluid să parcurgă cel puțin o dată întreg domeniul de fluid. Pasul de timp pentru fiecare computație a fost 0,1 s. Calculul s-a efectuat cu o singură iterație pe fiecare pas de timp.

6.6.2. Rezultate numerice

În această secțiune, analiza rezultatelor obținute se face pentru cazul $h/T = 1,5$, la toate vitezele considerate, 2, 4, 6, respectiv 8 noduri, pentru a oferi o imagine asupra influenței vitezei în zonele cu adâncimi mici. Ulterior se analizează cazurile cu adâncimile considerate.

În tabelul 6.4 sunt prezentate forțele totale, alcătuite din forțele de presiune și forțele de vâscozitate, ce acționează asupra corpului pe cele trei axe, la toate cele patru viteze considerate. Forța rezultantă pe direcția X reprezintă rezistența la înaintare a navei, pe direcția Y reprezintă deriva, iar pe direcția Z reprezintă forța hidrodinamică verticală ce face ca nava să se afunde din cauza interacțiunii cu fundul domeniului.

Tabelul 6.4. Forțele totale asupra carenei pentru cazul $h/T = 1,5$

Viteza, V_K	Axa	Tipul		
		Pressure Force	Viscous Force	Total Force
2 Nd	X	-1,8896e+06	-6,7361e+06	-8,6256e+03
	Y	2,1895e+04	1,4989e+01	2,1910e+04
	Z	-2,6659e+04	-5,4302e+00	-2,6664e+04
4 Nd	X	-3,1287e+03	-4,7776e+03	-7,9063e+03
	Y	8,8131e+04	4,4426e+01	8,8176e+04
	Z	-1,0688e+05	-2,8185e+01	-1,0691e+05
6 Nd	X	-1,5714e+03	-5,0237e+03	-6,5951e+03
	Y	1,9800e+05	8,8746e+01	1,9809e+05
	Z	-2,4043e+05	-3,7657e+01	-2,4046e+05
8 Nd	X	-2,5288e+03	-4,1342e+02	-2,9422e+03
	Y	3,5263e+05	2,7119e+00	3,5264e+05
	Z	-4,3170e+05	4,4192e+00	-4,3170e+05

Comparând contururile acestor forțe în funcție de viteză se pot observa ușor diferențe între cazuri, ceea ce subliniază încă o dată că, la creșterea vitezei navei în zone cu adâncimi mici, forțele hidrodinamice ce acționează pe carenă se modifică. Reprezentarea forțelor pe direcția Z , sub forma contururilor pe carenă, se poate observa în figura 6.6.

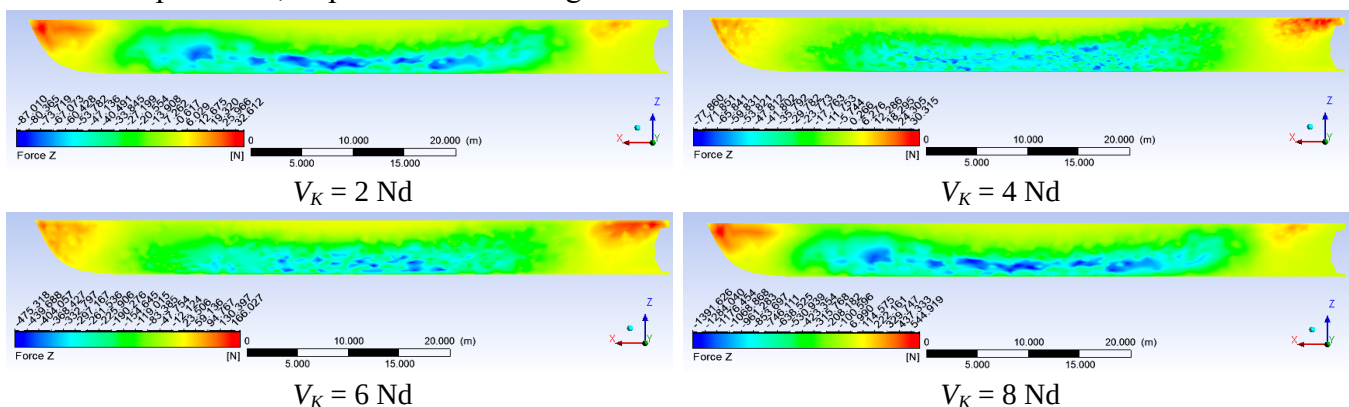


Fig. 6.6. Conturul forței verticale (forța Z)

Variația presiunii pe corpul navei este prezentată în figura 6.7, unde se poate observa că distribuția acesteia este una normală pentru corpul unei nave, având o zonă de presiuni pozitive în prova și în pupa navei și una de presiuni negative pe fundul carenei, de-a lungul corpului, ceea ce este în concordanță cu teoria prezentată în Capitolul 4.

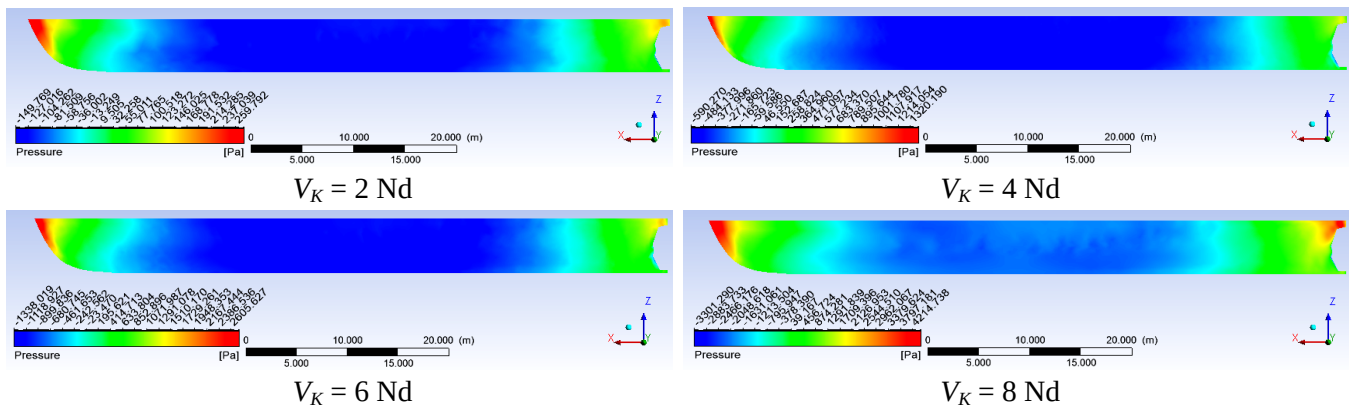


Fig. 6.7. Conturul presiunilor pe carenă la vitezele considerate în cazul $h/T = 1,5$

Post-procesarea în CFD permite afișarea variației presiunii de-a lungul chilei în plan diametral, prezentată în figura 6.8. Se observă că, la toate vitezele studiate, maximum presiunii se află în prova navei și minimum în zona cuplului maestru. Comparând cele patru situații, se poate concluziona că o viteză mai mare a navei produce o scădere a presiunii mai accentuată, chiar dacă adâncimea este constantă.

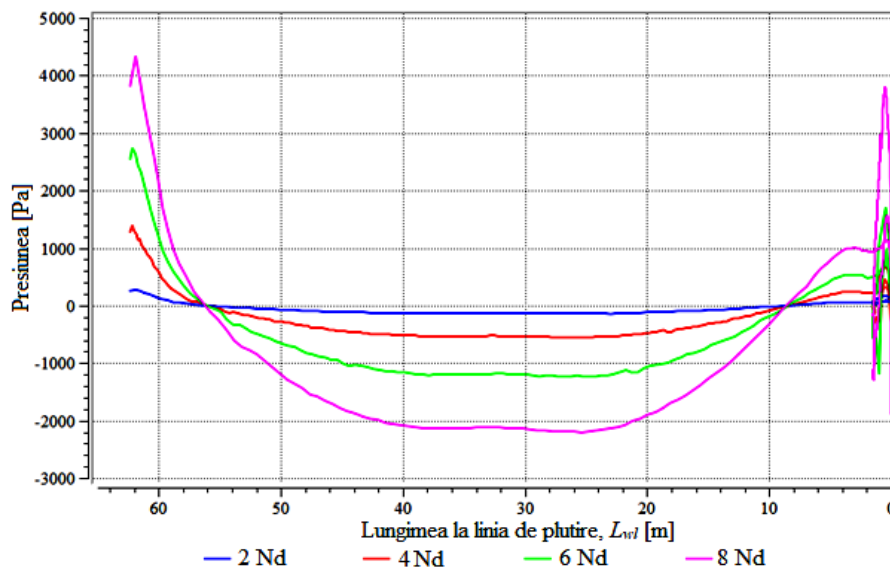


Fig. 6.8. Variația presiunii pe chilă în plan diametral pentru $h/T = 1,5$

Variația vitezei în domeniul de fluid de-a lungul carenei în timpul simulării este prezentată sub forma conturilor în figura 6.9. Așa cum era de așteptat, se poate observa creșterea potențială a vitezei de curgere, datorită interacțiunii dintre corpul navei și fundul domeniului. În toate cele patru cazuri prezentate, în zona curpînsă între carenă și fundul domeniului, viteza maximă a fluidului este cu 12,6 % mai mare decât viteza imprimată fluidului la începutul simulării.

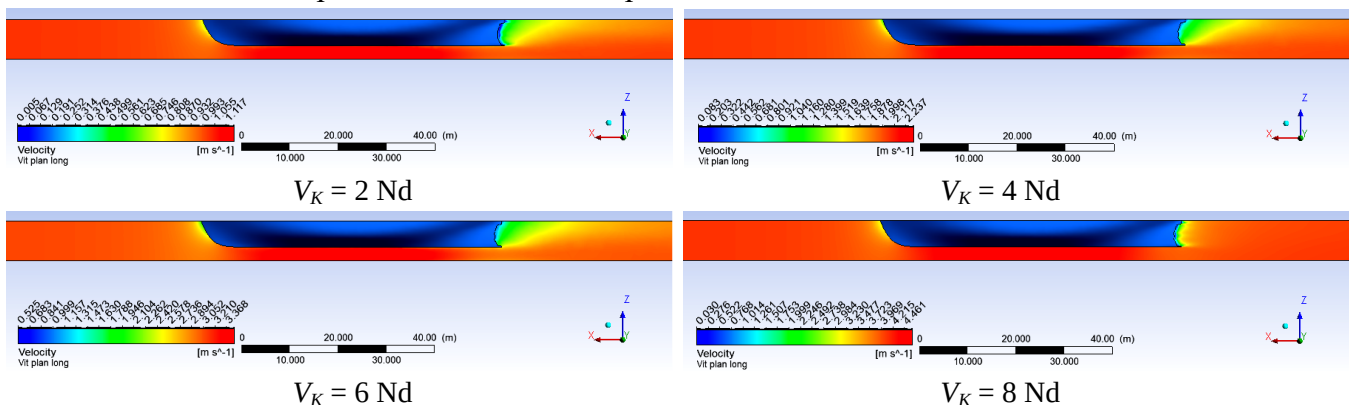


Fig. 6.9. Conturul vitezelor în planul longitudinal la vitezele considerate pentru $h/T = 1,5$

6.6.3. Verificarea și validarea

Pentru a vedea dacă metoda folosită este bună și soluția este convergentă, s-a verificat dacă masa totală de fluid intrată în domeniu este egală cu masa la ieșire. Convergența numerică adoptată pentru aceste calcule a fost criteriul reducerii diferenței maxime între iterații consecutive a celor trei componente ale vitezei și a presiunii sub valoarea 10^{-5} .

În ceea ce privește validarea, la momentul actual nu există date experimentale efectuate la bordul navei școală "MIRCEA" pentru validarea rezultatelor simulării efectuate, dar, în literatura de specialitate, metoda folosită pentru realizarea simulărilor este confirmată, prin efectuarea de simulări pe corpuri de navă standard, cum ar fi KCS²⁶ sau KVLCC2 Moeri tanker, validate deja cu date experimentale.

6.7. CALCULUL SQUATUL PRIN METODA CFD ȘI COMPARAȚIA ACESTUIA CU FORMULELE EMPIRICE

Forțele hidrodinamice verticale, calculate cu ANSYS CFX, au fost folosite pentru calculul squatului; acestea fiind interpretate ca forțe totale ce acționează pe carenă. Ele reprezintă suma dintre forța de flotabilitate statică și cea dinamică, aceasta din urmă modificându-se în funcție de presiunea hidrodinamică generată de mișcarea carenei desupra fundului domeniului.

Se poate afirma că la creșterea vitezei de deplasare a navei, în condiții de adâncime mică, chiar extremă în unele cazuri ($h/T = 1,1$ și $h/T = 1,2$), forța hidrodinamică verticală scade, având valori negative mai mari, fapt ce indică o puternică interacțiune între carenă și fundul domeniului.

În ceea ce privește variația forței totale de flotabilitate în raport cu adâncimea, la aceeași viteză, se observă o creștere a acesteia pe măsură ce adâncimea crește. Pentru toate vitezele, valoarea minimă a forței se întâlnește la $h/T = 1,1$, iar cea maximă la $h/T = 3,0$, excepție făcând viteza de 8 noduri, unde valoarea minimă se obține la $h/T = 1,5$.

Se poate concluziona că la creșterea adâncimii și implicit a rezervei de apă sub chilă, această forță negativă crește, interacțiunea dintre navă și fundul domeniului este mai mică, iar efectul de squat scade în intensitate. O imagine de ansamblu a variației acestei forțe hidrodinamice în funcție de viteză și adâncime este prezentată în figura 6.10.

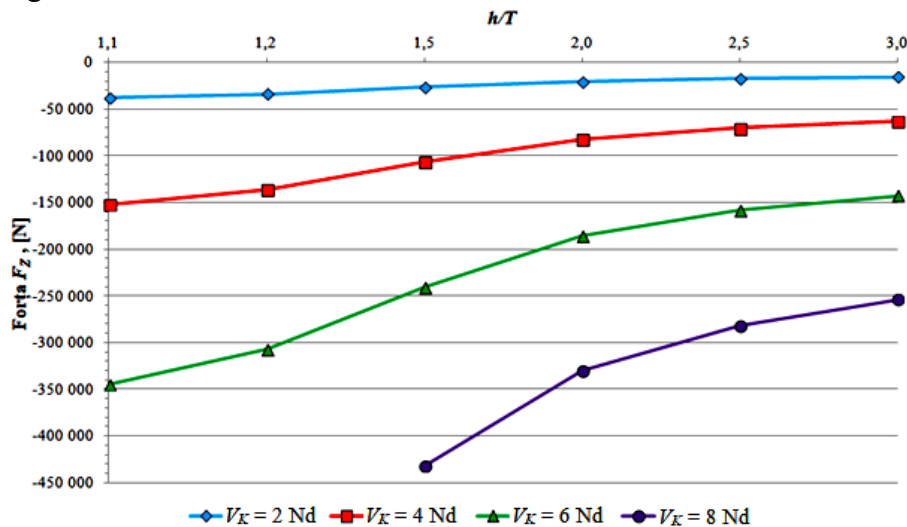


Fig. 6.10. Variația forței hidrodinamice în funcție de viteză și adâncime

Utilizând valorile forței totale de flotabilitate (F_z) obținute în cadrul simulărilor s-a calculat, squatul pentru fiecare din cele 22 de cazuri. Astfel, pentru corpul navei școală "MIRCEA" s-au obținut valorile squatului prezentate în tabelul 6.5.

Tabelul 6.5. Valorile squatului în condițiile testate

$V_K \backslash h/T$	$h/T = 1,1$	$h/T = 1,2$	$h/T = 1,5$	$h/T = 2,0$	$h/T = 2,5$	$h/T = 3,0$
2 Nd	-0,006858	-0,006160	-0,004821	-0,003724	-0,003176	-0,002862
4 Nd	-0,027480	-0,024670	-0,019329	-0,014917	-0,012720	-0,011462
6 Nd	-0,062316	-0,055540	-0,043475	-0,033578	-0,028635	-0,025807
8 Nd	-	-	-0,078051	-0,059711	-0,050980	-0,045932

²⁶ KRISO (Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering) Container Ship

Grafic, variația squatului în funcție de viteză se observă în figura 6.11, pentru fiecare din cele șase adâncimi simulate.

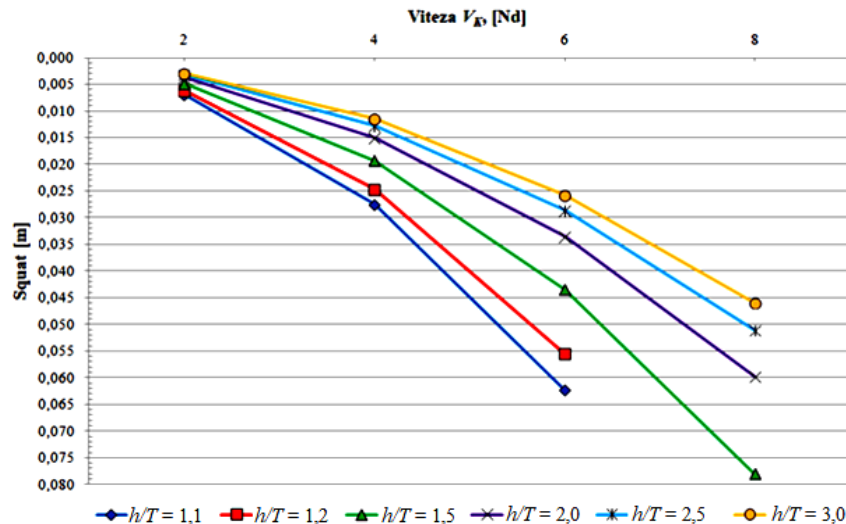
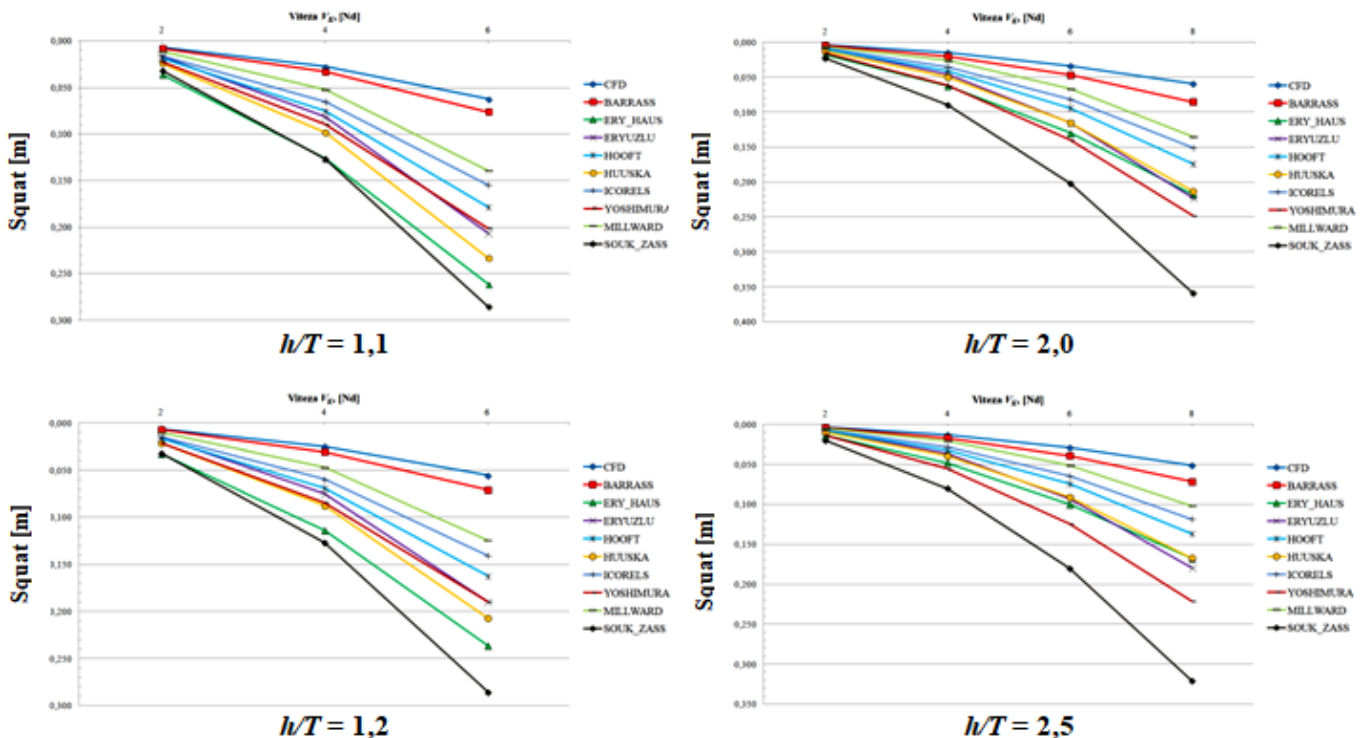


Fig. 6.11. Variația squatului în funcție de viteză și adâncime

În concluzie, se observă că variația squatului este dependentă de adâncime și viteză. Astfel, cu cât rezervă de apă sub chilă mai mică, iar viteza este mai mare, cu atât squatul este mai mare, mai pronunțat și produce creșterea pescajului navei. Trebuie totuși subliniat că valorile obținute în urma simulărilor CFD sunt de ordinul centimetrilor, valori ce sunt în concordanță cu dimensiunile navei și vitezele considerate, dar care ar putea fi greu de sesizat în realitate, fapt ce a fost constatat în cadrul cercetărilor experimentale desfășurate la bordul navei școală "MIRCEA", prezentate în Capitolul 5.

În scopul de a evalua fiabilitatea predicției squatului navei folosind forțele hidrodinamice verticale determinate cu ANSYS CFX, s-a făcut o comparație cu nouă dintre cele mai comune metode empirice pentru calcularea squatului în ape de adâncime mică, fără restricții laterale. Cele 9 metode sunt: *Barrass*, *Eryuzlu* și *Hausser*, *Eryuzlu ș.a.*, *Hooft*, *Huuska*, *ICORELS*, *Yoshimura*, *Millward*, *Soukhomel* și *Zass*, acestea fiind prezentate în Capitolul 2 al tezei.

Figura 6.12 ilustrează, pentru fiecare adâncime considerată, variația squatului pentru toate cele 10 metode utilizate. În general, se observă o tendință de creștere a squatului proporțională cu viteza, în toate situațiile și pentru fiecare metodă. În ceea ce privește diferențele între metode, se apreciază că metoda lui *Barrass* dă valorile cele mai apropiate de metoda CFD, în toate situațiile analizate, iar restul metodelor supraestimează squatul în proporții diferite de la o adâncime la alta; metoda lui *Soukhomel* și *Zass* fiind cea care are valorile cele mai mari ale squatului.



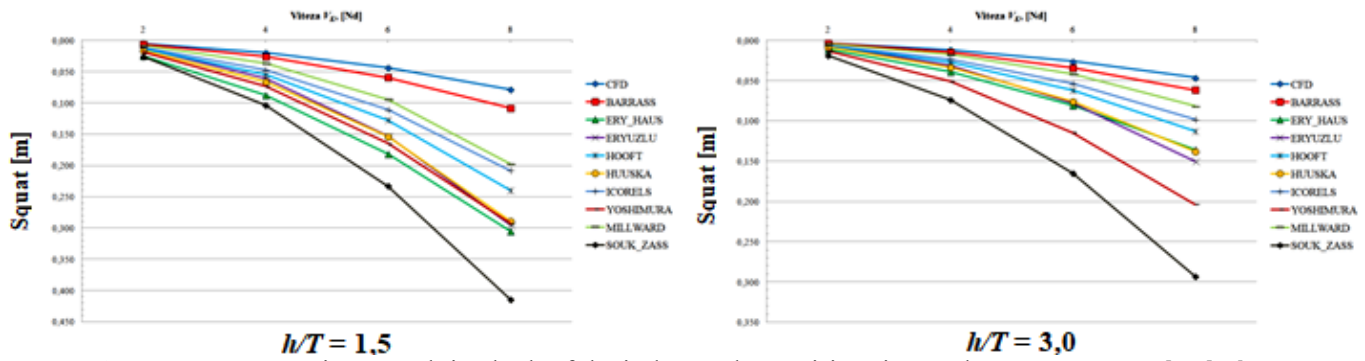


Fig. 6.12. Comparația squatului calculat folosind metode empirice și metoda CFD pentru valorile h/T

În general, se apreciază că metodele care se apropie cel mai bine de valorile obținute prin simulările CFD sunt *Barrass*, *Millward*, *ICORELS* și *Hooft*. În calculele efectuate, restricțiile de aplicare au fost respectate pentru toate aceste metode.

În figura 6.13 s-au comparat rezultatele obținute cu cele validate în literatura de specialitate și se observă o asemănare foarte bună. *Jachowski* (2008) [19] compară valorile CFD cu alte metode empirice, dar simulările sunt efectuate pe un model redus la scară al KCS, pentru trei adâncimi și viteze cuprinse între 4 și 21,5 noduri.

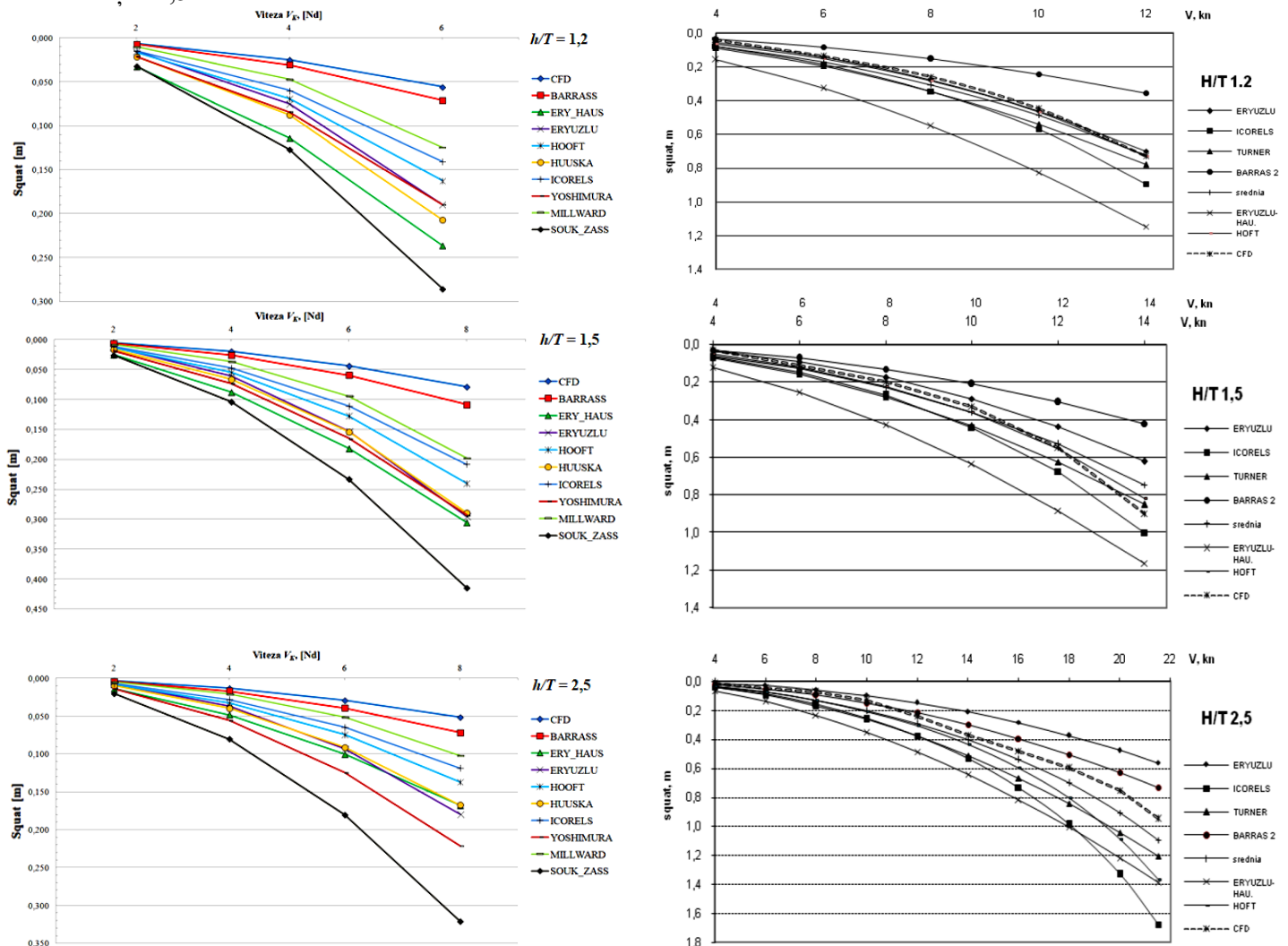


Fig. 6.13. Comparația rezultatelor cu literatura de specialitate pentru trei valori h/T [19]

Comparațiile prezentate mai sus arată influența adâncimii apei și a vitezei navei asupra squatului. Se observă că squatul calculat prin metoda CFD este în concordanță cu majoritatea metodelor empirice prezentate, metoda *Barrass* fiind cea mai apropiată ca valori, aceasta supraestimând cu procente cuprinse între 12 % și 43 %, în condițiile în care, toate metodele supraestimează squatul, dar cu valori ce depășesc 100 % până la 500 %. Valorile calculate ale squatului se încadrează între 0,0028 m și 0,078 m pentru viteze reale ale navei de 2, 4, 6 și 8 noduri.

Rezultatele studiului prezentat demonstrează că ANSYS CFX poate fi utilizat eficient pentru predicția squatului naval în ape de adâncime mică, dar este necesară investigarea ulterioară a efectelor hidrodinamice produse în șenale de mică adâncime, restricționate în lateral și canale.

CONCLUZII

C.1. CONCLUZII GENERALE

Cercetările efectuate în cadrul acestei teze extind problematica determinării cât mai precise a squatului navelor, aceasta fiind un aspect foarte important pentru siguranța navigației, în special în zonele cu ape limitate în lateral și în adâncime, unde acest fenomen este mai pronunțat și are efecte vizibile.

Principalele concluzii rezultate în urma cercetării științifice în domeniul squatului și al fenomenelor asociate care apar la navigația prin canale sau zone cu adâncimi mici sunt:

- în studiile experimentale efectuate pe modelele de navă la scară, s-a observat că cel mai utilizat model este KVLCC2, al unei nave de tip tanc petrolier de mare capacitate, iar pentru obținerea unor rezultate concludente, încercările de laborator au cuprins o serie largă de combinații între adâncimea și lățimea canalului, precum și între adâncime și pescajul modelelor folosite;
- determinarea squatului depinde de caracteristicile navei și configurația canalului sau zonei de trecere. Principalii parametri ai navei care influențează squatul sunt lungimea, lățimea, pescajul, coeficientul de finețe bloc și viteza. Aspectele legate de parametrii zonei de trecere sunt adâncimea apei, secțiunea transversală a șenalului și lățimea acestuia;
- existența în literatura de specialitate a numeroși autori care au definit relații de calcul pentru a estima cât mai bine squatul, ce au fost modificate și redefinite timp de peste 50 de ani de cercetare asupra subiectului, dar care nu au ajuns încă la o formă general valabilă pentru toate tipurile de nave și configurații de canale;
- în cadrul studiului de caz asupra squatului navelor militare în Canalul Sulina a rezultat că Fregata 1 și nava multirol de suport pot traversa canalul cu o viteză maximă de 8 noduri, Fregata 2 cu 12 noduri, iar nava de patrulare cu 16 noduri. De asemenea, s-a observat că pescajele prova și pupa variază cu viteza și factorul de blocaj conform formulei lui *Barrass*. O altă concluzie a simulărilor este diferența observată între viteza dorită, generată de rotațiile motorului și viteza reală deasupra fundului, diferență ce a variat între 0,1 noduri și 7 noduri;
- în cadrul analizei squatului și a rezervei de apă sub chilă pentru cele mai reprezentative nouă tipuri de nave din industria navală actuală s-a concluzionat că:
 - indiferent de viteză, navele de tip ULCC nu pot naviga din cauza squatului, nici pe canalul rectangular și nici pe cel trapezoidal, având dimensiunile specificate în cadrul studiului;
 - navele de tip VLCC pot tranzita canalul rectangular până la viteza de 8 noduri, iar pe cel trapezoidal până la viteza de 12 noduri;
 - squatul pentru celelalte tipuri de nave se încadrează în limite normale, iar rezervă de apă sub chilă este suficientă chiar și la viteze de 12 noduri, ce permite tranzitarea canalelor considerate.
- în cadrul studiului de caz privind interacțiunea navă – navă la situația de întâlnire s-a observat creșterea pescajului la prova și pupa navei, dar și apariția unui moment de pivotare ce abate nava de la drum. S-a concluzionat că o viteză mai mare a navei, o distanță mică între nave și o rezervă de apă sub chilă redusă produc o interacțiune puternică între nave;
- studierea parametrilor hidrodinamici ai unei nave de transport mărfuri în vrac și a interacțiunii navă – mal folosind simulatorului de navigație NTPRO 5000 a dus la concluzia că squatul produs asupra navei este mai mare în condițiile apropierei de malul canalului, decât în condiții de mare liberă. De asemenea, s-a remarcat faptul că variația forței laterale ce acționează asupra corpului navei la viteza de 7,4 noduri are un trend similar pentru toate adâncimile studiate. Pentru viteza de 16 noduri, efectul de banc este mai pronunțat și face ca traiectoria navei să fie deviată spre malul opus, unde se produce coliziunea;
- în urma cercetărilor experimentale de la bordul navei școală "MIRCEA" s-au extras următoarele concluzii:

- singura modalitate la bordul navei de a citi pescajul este prin observare directă a scărilor de pescaj;
- parametrii geometrici ai navei școală "MIRCEA", cum ar fi lungimea, lățimea, pescajul sau coeficientul de finețe bloc, ce au valori prea mici în raport cu dimensiunile acvatoriilor portuare, dar și viteza mică de deplasare nu au favorizat apariția squatului la manevrele de intrare/ieșire în/din porturile de escală;
- adâncimea apei în porturile tranzitate, precum și lățimea șenalului navigabil au fost variabile, iar apariția fenomenului de squat îngreunată și observarea acestuia dificilă;
- în urma simulărilor numerice s-a observat că variația vitezei obținută în domeniul de fluid de-a lungul carenei are o distribuție normală, cu o creștere potențială a vitezei de curgere sub carenă, datorită interacțiunii dintre corpul navei și fundul domeniului. De asemenea, variația presiunii pe carenă este în concordanță cu noțiunile teoretice privind domeniul de presiuni al unei nave, cu două zone de presiune pozitivă, una la prova și una la pupa, și una de presiune negativă pe fundul carenei, de-a lungul său;
- pentru a evalua fiabilitatea predicției squatului navei, folosind forțele hidrodinamice verticale determinate cu ANSYS CFX, s-a făcut o comparație cu nouă dintre cele mai comune metode empirice pentru calcularea squatului în ape de adâncime mică, fără restricții laterale, și s-a apreciat că metodele care se apropie cel mai bine de valorile obținute prin simulările CFD sunt *Barrass*, *Millward*, *ICORELS* și *Hooft*.

C.2. CONTRIBUȚII ORIGINALE

Prin cercetarea științifică desfășurată și rezultatele obținute s-au adus următoarele contribuții:

a. contribuții teoretice:

- identificarea și descrierea principalelor canale navigabile utilizate în transportul maritim mondial;
- prezentarea stadiului actual al cercetărilor efectuate asupra fenomenului de squat, evoluția cercetărilor de-a lungul timpului, principalele modele de navă și bazine de carene utilizate în cadrul experimentelor;
- o prezentare comprehensivă a relațiilor empirice de calcul al squatului ce se regăsesc în literatura de specialitate, în urma căreia au fost identificate tipurile de canal unde aceste relații pot fi folosite și condițiile restrictive de aplicare;

b. contribuții numerice:

- efectuarea unui studiu de caz, prin simulare, asupra producerii squatului la patru nave maritime militare, similare cu cele din Forțele Navale Române, atunci când acestea se deplasează cu diferite viteze la intrarea în Canalul Sulina;
- analiza squatului și a rezervei de apă sub chilă pentru nouă tipuri de nave maritime comerciale, plecând de la super tancuri petroliere până la remorchere, care tranzitează la vitezele de 6, 8, 10 și 12 noduri, două categorii de canale, unul cu secțiune transversală rectangulară și unul trapezoidal;
- calculul squatului unei nave tip general cargo aflată în canale de diferite lățimi și adâncimi, pentru a observa variația squatul maxim la creșterea vitezei și a determina viteza maximă la care se produce eșuarea navei pe canal;
- efectuarea unui studiu de caz privind interacțiunea hidrodinamică a două nave într-un canal, în cazul situației de întâlnire;
- efectuarea unui studiu de caz privind interacțiunea hidrodinamică între o navă de transport mărfuri generale și malul unei porțiuni din Canalul Suez;
- calculul squatului prin metoda CFD și analiza variației acestuia în funcție de viteză și adâncimea domeniului de fluid;
- realizarea unui studiu comparativ între squatul determinat cu ajutorul forțelor hidrodinamice obținute cu programul ANSYS CFX și squatul calculat cu 9 relații empirice existente în literatură, pentru carena navei școală "MIRCEA";

c. contribuții experimentale:

- eliminarea dificultății citirii în marș a pescajului pupa la bordul navei școală "MIRCEA" prin înregistrarea acestuia cu ajutorul unei camere video și citirea ulterioară a valorilor de pescaj;

- analiza vitezei, pescajului și traiectoriei navei la intrarea/ieșirea în/din porturile de escală ale voiajului internațional;
- modelarea geometrică a carenei, utilizând planul de forme disponibil la bordul navei școală "MIRCEA";
- efectuarea a 22 de simulări numerice CFD pentru observarea variației presiunilor, vitezelor și forțele hidrodinamice care acționează pe carenă, la deplasarea acesteia cu patru viteze într-un domeniu de fluid cu diferite adâncimi.

C.3. PERSPECTIVE DE DEZVOLTARE ULTERIOARĂ

Demersurile realizate pe parcursul elaborării tezei de doctorat permit desfășurarea în continuare a cercetărilor teoretice și experimentale în următoarele direcții:

- efectuarea de cercetări prin simulare numerică asupra efectelor hidrodinamice produse la manevra navei în ecluze, în vederea studierii domeniului de curgere al navei și a interacțiunii acestuia cu pereții laterali ai ecluzei;
- construirea unui model la scară a carenei navei școală "MIRCEA" și analiza experimentală a producerii fenomenului de squat la deplasarea acestuia într-un bazin de carene cu adâncime mică;
- efectuarea de simulări numerice CFD asupra producerii squatului la corpului navei școală "MIRCEA" în diferite condiții, cum ar fi: la deplasarea acestuia în canale de lățimi și adâncimi variabile; adăugarea elicei și cârmei în geometria corpului pentru a determina influența hidrodinamică a acestora din punct de vedere al producerii squatului; definirea corpului navei cu 6 grade de libertate și deplasarea acestuia în domenii de fluid cu suprafață liberă și mesh dinamic, pentru studierea producerii valurilor în zone cu adâncimi mici.

C.4. DISEMINAREA REZULTATELOR

Rezultatele cercetărilor teoretice și experimentale asupra subiectului abordat obținute pe parcursul studiilor doctorale au fost valorificate prin:

- a. publicarea a 11 lucrări științifice:
 - 1 articol indexat ISI Web of Knowledge (unic autor);
 - 7 articole incluse în baze de date internaționale (2 unic autor, 5 prim autor);
 - 3 articole în volumele unor manifestări științifice internaționale și naționale (3 prim autor);
- b. participarea cu lucrări științifice la 9 conferințe naționale și internaționale.

ACKNOWLEDGMENT

Rezultatele prezentate în acest articol au fost obținute cu sprijinul Ministerului Fondurilor Europene prin Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013, Contract nr. POSDRU/159/1.5/S/132395.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- [1] Y. M. Ahmed, "Numerical Simulation for the Free Surface Flow around a Complex Ship Hull Form at Different Froude numbers", in Alexandria Eng. Journal, **vol. 50**, no. 3, 2011, pp. 229-235.
- [2] N. Alderf, E. Lefrançois, P. Sergent and P. Debaillon, "Transition Effects on Ship Sinkage in Highly Restricted Waterways", in Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, **vol. 224**, issue2, June 2010, pp. 141-153.
- [3] C. B. Barrass, Ship Design and Performance for Masters and Mates, Editura Elsevier, Londra, 2007.
- [4] C. B. Barrass, D. R. Derrett, Ship Stability for Masters and Mates, 7th ed., Editura Elsevier, Oxford, 2012.
- [5] A. Biran, R. Lopez-Pulido, Ship Hydrostatics and Stability, 2nd ed., Editura Elsevier, Oxford, 2014.
- [6] M. J. Briggs, "Ship Squat Predictions for Ship/Tow Simulator", in Coastal and Hydraulics Engineering Technical Note 72, US Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, 2006.
- [7] M. J. Briggs, P. J. Kopp, V. Ankudinov and A. L. Silver, "Ship Squat Comparison and Validation using PIANC, Ankudinov and BNT Predictions", in The 2nd International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water: Ship to Ship Interaction, Trondheim, May 2011, pp. 59-70.
- [8] M. J. Briggs, M. Vantorre, K. Uliczka and P. Debaillon, "Prediction of Squat for Undeekeel Clearance", in Handbook of Coastal and Ocean Eng., Los Angeles, 2010, pp. 723-774.
- [9] Gina M. Casadei, Dynamic-mesh Techniques for Unsteady Multiphase Surface-Ship Hydrodynamics, Master Thesis, The Pennsylvania State University, 2010.
- [10] P. Debaillon, "Numerical Investigation to Predict Ship Squat", in Journal of Ship Research, **vol. 54**, no.2, June 2010, pp. 133-140.
- [11] G. Delefortrie, M. Vantorre, K. Eloot, J. Verwilligen and E. Lataire, "Squat Prediction in Muddy Navigation Areas", in Ocean Eng., **vol. 37**, 2010, pp. 1464-1476.
- [12] K. Eloot, M. Vantorre, Ship Behaviour in Shallow and Confined Water: an Overview of Hydrodynamic Effects through EFD, Editura Maritime Technology Division, Ghent, 2007.
- [13] K. Eloot, M. Vantorre et al., "Squat During Ship-to-Ship Interactions in Shallow Water", in The 2nd International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water: Ship to Ship Interaction, Conference Proceedings, Royal Institution of Naval Architects, London, 2011, pp. 117-126.
- [14] K. Elliot, J. Verwilligen and M. Vantorre, "An Overview of Squat Measurements for Container Ships in Restricted Water", in Safety and Operations in Canals and Waterways, Conference Proceedings, Glasgow, 2008, pp. 106-116.
- [15] T. Gourlay, "A Brief History of Mathematical Ship-Squat Prediction, Focussing on the Contributions of E. O. Tuck", in Journal of Engineering Mathematics, **vol. 70**, issue 1-3, July 2011, pp. 5-16.
- [16] T. Gourlay, "Sinkage and Trim of Two Ships Passing Each Other on Parallel Courses", in Ocean Eng., **vol. 36**, issue 14, Oct. 2009, pp. 1119-1127.
- [17] A. Iranzo, J. Domingo, I. Trej, M. Terceno and J. Valle, "Calculation of the Resistance and the Wave Profile of a 3600 TEU Container Ship", in Congreso MARINE 2007, Barcelona, June 2007, pp. 1-6.
- [18] E. C. Gh Isbăsoiu, Tratat de mecanica fluidelor, Editura AGIR, București, 2011.
- [19] J. Jachowski, "Assessment of Ship Squat in Shallow Water using CFD", in Archives of Civil and Mechanical Eng., **vol. VIII**, no. 1, 2008, pp. 27-36.
- [20] E. Lataire, M. Vantorre and G. Delefortrie, "A Prediction Method for Squat in Restricted and Unrestricted Rectangular Fairways", in Ocean Eng., **vol. 55**, Dec. 2012, pp. 71-80.
- [21] E. Lataire, M. Vantorre, J. Vandenbroucke and K. Eloot, "Ship to Ship Interaction Forces during Lightering Operations", in The 2nd International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water: Ship to Ship Interaction, Conference Proceedings, Royal Institution of Naval Architects, London, 2011, pp. 211-222.
- [22] D. Obreja, Teoria navei – Concepte și metode de analiză a performanțelor de navigație, Editura Didactică și Pedagogică, București, 2005.
- [23] David Frisk and Linda Tegehall, Prediction of High-Speed Planing Hull Resistance and Running Attitude – A Numerical Study Using Computational Fluid Dynamics, Master Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2015.
- [24] P. Senthil and C. Bihod, "Numerical Estimation of Shallow Water Resistance of a River-Sea Ship using CFD", in International Journal of Computer Applications, **vol. 71**, no. 5, 2013, pp. 33-40.
- [25] F. Stern et al., "Computational Ship Hydrodynamics: Nowadays and Way Forward", in International Shipbuilding Progress, **vol.60**, no. 1-4, 2013, pp. 3-105.
- [26] J. Verwilligen and J. Richter, "Analysis of Full Ship Types in High-blockage Lock Configurations", in MARSIM 2012, Singapore, Dec. 2012, pp. 1-10.
- [27] H. Wang, Z. Zou, "Numerical Prediction of Hydrodynamic Forces on a Ship Passing Through a Lock", in China Ocean Eng., **vol. 28**, no. 3, 2014, pp. 421-432.

- [28] J. Yao and Z. Zou, “Calculation of Ship Squat in Restricted Waterways by Using a 3D Panel Method”, in Journal of Hydrodynamics, ser. B, **vol. 22**, issue 5, supplement 1, Oct. 2010, pp. 489-494.
- [29] H. Yoon, C. D. Simonsen, L. Benedetti, J. Longo, Y. Toda and F. Stern, “Benchmark CFD Validation Data for Surface Combatant 5415 in PMM Maneuvers – Part I : Force/moment/motion Measurements”, in Ocean Eng., **vol. 109**, 2015, pp. 705–734.
- [30] H. Zeraatgar, K. Vakilabadi and R. Yousefnejad, “Parametric Analysis of Ship Squat in Shallow Water by Model Test”, in Brodo Gradnja, **vol. 62**, 2011, pp. 37-43.
- [31] W. Zhang, Z. J. Zou and D. D. Deng, “A Study on Prediction of Ship Maneuvering in Regular Waves”, in Ocean Eng., **vol. 137**, May 2017, pp. 367-381.
- [32] L. Zou and L. Larsson, “Computational Fluid Dynamics (CFD) Prediction of Bank Effects including Verification and Validation”, in Journal of Marine Science and Technology, **vol. 18**, issue 4, Dec. 2013, pp. 310-323.
- [33] L. Zou and L. Larsson, “Confined Water Effects on the Viscous Flow around a Tanker with Propeller and Rudder”, in International Shipbuilding Progress, **vol. 60**, 2013, pp. 309-343.
- [34] *** Ansys Inc., Documentația ANSYS CFX 16.2, 2015.
- [35] *** Documentația tehnică a navei școală “MIRCEA”
- [36] *** Proceedings of the 23rd ITTC – The Manoeuvring Committee (vol. 1), 2002.
- [37] <http://www.bankeffects.ugent.be>
- [38] <http://www.pianc.org>
- [39] <http://www.shallowwater.be>
- [40] <http://www.suezcanal.gov.eg>