

**UNIVERSITATEA “DUNĂREA DE JOS” DIN  
GALAȚI  
Facultatea de Arhitectură Navală**



**TEZĂ DE DOCTORAT  
CONTRIBUȚII LA STUDIUL CURGERII ÎN  
JURUL CORPULUI NAVEI  
ECHIPATE CU ELICE ȘI CÂRMĂ**

**Doctorand  
Ing. Oana Stoian**

**Conducător Științific  
Prof.univ.dr.ing. Adrian Lungu**

**Galați 2012**



UNIUNEA EUROPEANĂ



GUVERNUL ROMÂNIEI  
MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI  
ȘI PROTECȚIEI SOCIALE  
AMFOSDRU



Fondul Social European  
POSDRU 2007-2013



Instrumente Structurale  
2007-2013



MINISTERUL  
EDUCAȚIEI  
CERCETĂRII  
ȘI SPORTULUI

OIPOSDRU



UNIVERSITAS  
GALATIENSIS

**Universitatea “*Dunărea de Jos*” din Galați**  
Facultatea de Arhitectură Navală

**TEZĂ DE DOCTORAT**

**CONTRIBUȚII LA STUDIUL CURGERII  
ÎN JURUL CORPULUI NAVEI  
ECHIPATE CU ELICE ȘI CÂRMĂ**

**CONTRIBUTIONS ON THE STUDY OF THE FLOW  
DEVELOPED AROUND THE  
HULL-PROPELLER-RUDDER CONFIGURATION**

**Doctorand  
Ing. Oana Stoian**

**Conducător Științific  
Prof.univ.dr.ing. Adrian Lungu**

*Lucrare finanțată în cadrul proiectului POSDRU EFICIENT 88/1.5/S  
ID-61445 2009-2012.*

**Galați 2012**

e 11916/14.11.2012

C ă t r e

Universitatea “ Dunărea de Jos “ din Galați vă face cunoscut că în data de 12.12.2012, ora 11.00, în sala Senatului Universității “Dunărea de Jos” din Galați, va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat intitulată: “CONTRIBUȚII LA STUDIUL CURGERII ÎN JURUL CORPULUI NAVEI ECHIPATE CU ELICE ȘI CÂRMĂ”, elaborată de domnul/doamna STOIAN OANA(MARCU), în vederea conferirii titlului științific de doctor în Domeniul de doctorat - Inginerie mecanică.

Comisia de doctorat are următoarea componență :

- 1. Președinte:** Prof.univ.dr.ing. Leonard DOMNIȘORU  
*Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați*
  
- 2. Conducător de doctorat:** Prof.univ.dr.ing. Adrian LUNGU  
*Prorector-Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați*
  
- 3. Referent oficial:** Prof.univ.dr.ing. Anton ANTON  
*Universitatea Tehnică de Construcții din București*
  
- 4. Referent oficial:** Prof.univ.dr.ing. Romeo SUSAN-RESIGA  
*Universitatea “Politehnica” din Timișoara*
  
- 5. Referent oficial:** Prof.univ.dr.ing. Dan-Constantin OBREJA  
*Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați*

Cu această ocazie vă transmitem rezumatul tezei de doctorat și vă invităm să participați la susținerea publică. În cazul în care doriți să faceți eventuale aprecieri sau observații asupra conținutului lucrării, vă rugăm să le transmiteți în scris pe adresa Universității, str. Domnească nr. 47, 800008 - Galați, Fax - 0236 / 461353.



Prof.univ.dr.ing. Julian Gabriel BÎRSAN

## Cuprins

	<i>Cuprins</i>	v
I	INTRODUCERE	1
	I.1. Justificarea abordării temei	1
	I.2. Obiective ale cercetării. Metodologie de studiu	2
	I.3. Stadiul actual al cunoașterii	3
	I.4. Benchmarking	5
II	MODEL MATEMATIC	6
	II.1. Ecuațiile de guvernare ale curgerii vâscoase	6
	II.1.1. Modelarea turbulenței	7
	II.1.1.1. Modelul de turbulență <i>EASM</i>	8
	II.1.2. Condiții la limită	8
	II.1.3. Modelarea elicei. Teoria liniei portante	9
	II.1.3.1. Teoria liniei portante	9
	II.1.4. Discretizarea ecuațiilor. Metoda Volumelor Finite	10
	II.2. Domeniu de calcul. Rețea de discretizare	10
III	VERIFICARE	12
	III.1. Condiții de curgere	12
	III.2. Grile de studiu	13
	III.3. Metodologia de verificare	13
	III.3.1. Determinarea $U_I$	13
	III.3.2. Determinarea $U_G$	14
	III.3.2.1. Soluție monoton–convergentă	14
	III.3.2.2. Soluție oscilator–convergentă	14
	III.3.2.3. Soluție divergentă	14
	III.4. Verificare	14
	III.4.1. Carena nudă	15
	III.4.2. Nava echipată cu elice	15
	III.4.3. Nava echipată cu elice și cârmă	15
IV	STUDIUL CURGERII ÎN JURUL CARENEI NUDE	17
	IV.1. Condiții de modelare	17
	IV.2. Studiul hidrodinamic al curgerii în jurul carenei nude	18
	IV.2.1. Validarea metodologiei de studiu al curgerii în jurul carenei nude	18
	IV.2.2. Studiul curgerii în jurul carenei nude	20
	IV.3. Rezistența la înaintare a carenei nude	24
	IV.3.1. Validarea metodologiei de calcul al rezistenței la înaintare	24
	IV.3.2. Rezistența la înaintare a carenei nude în curent incident	25
	IV.4. Forțele hidrodinamice laterale și momentele hidrodinamice pe corpul navei	25

	IV.4.1. Validarea metodologiei de calcul al forțelor și momentelor hidrodinamice pe corpul navei	25
	IV.5. Concluzii asupra studiului curgerii în jurul carenei nude	26
V	STUDIUL CURGERII ÎN JURUL CORPULUI NAVEI ECHIPATE CU ELICE	28
	V.1. Elicea navală	28
	V.2. Condiții de modelare	28
	V.3. Studiul hidrodinamic al curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice	29
	V.3.1. Validarea metodologiei de calcul al elicei	29
	V.3.2. Studiul curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice	30
	V.4. Rezistența la înaintare a navei echipate cu elice în curent incident	34
	V.5. Validarea metodologiei de calcul al propulsiei	34
	V.5.1. Coeficientul de siaj efectiv	35
	V.5.2. Coeficientul de suțiune	35
	V.5.3. Randamentul relativ de rotație	35
	V.5.4. Coeficientul de influență a corpului	35
	V.5.5. Coeficientul cvasipropulsiv	35
	V.6. Forțele hidrodinamice laterale și momentele hidrodinamice pe corpul navei echipate cu elice	36
	V.7. Concluzii asupra studiului curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice	37
VI	STUDIUL CURGERII ÎN JURUL CORPULUI NAVEI ECHIPATE CU ELICE ȘI CÂRMĂ	38
	VI.1. Cârmă–suprafață pasivă de control	38
	VI.2. Condiții de modelare	38
	VI.3. Studiul hidrodinamic al curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice și cârmă	39
	VI.4. Rezistența la înaintare a navei echipate cu elice și cârmă în curent incident	43
	VI.5. Forțele hidrodinamice laterale și momentele hidrodinamice pe corpul navei echipate cu elice și cârmă	44
	VI.5.1. Validarea metodologiei numerice de tip “derivă statică”	44
	VI.5.2. Validarea metodologiei numerice de tip “cârmă statică”	45
	VI.5.3. Validarea metodologiei numerice de tip “derivă și cârmă statică”	47
	VI.5.4. <i>PMM</i> virtual	48
	VI.6. Concluzii asupra studiului curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice și cârmă	49
VII	CONCLUZII, CONTRIBUȚII ȘI PERSPECTIVE	51
	<i>Bibliografie</i>	53

# Capitolul I

## Introducere

La nivelul anului 2012, studiul curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice și cârmă este un subiect de actualitate, în lumea hidrodinamicii navale. Transportul pe apă este un domeniu în expansiune—motiv care impune investigarea avansată a tuturor fenomenelor ce iau naștere și se dezvoltă în jurul configurației corp—elice—cârmă, atunci când nava urmează un drum drept sau efectuează o mișcare de manevră.

Direcție principală de analiză a curgerii în jurul navei echipate cu elice și cârmă, studiul proceselor turbulente care însoțesc mișcarea fluidului în zona pupa este, în aceste condiții, un subiect de actualitate în mediul științific internațional. Rigiditatea crescută a regulilor *International Maritime Organization (IMO)*, abreviere în engleză), în materie de siguranță pe mare și de protejare a mediului marin, impune abordarea scrupuloasă a acestei direcții de cercetare. Astfel, o serie de concepte precum *“safety at sea”* sau *„environmentally friendly ships”* sunt transformate în adevărate motoare ale progresului pentru hidrodinamica navală contemporană.

Viteza și rezistența la înaintare, siajul, suucțiunea și împingerea, puterea și consumul motorului, forțele și momentele pe corpul navei sunt mărimi care depind de hidrodinamica curgerii turbulente din jurul carenei echipate cu elice, cârmă sau diverși apendici, de formele navei, precum și de fizica fenomenelor ce iau naștere la interacțiunea corp—elice—cârmă. Nevoia de a pătrunde esența hidrodinamică a acestor fenomene în sensul îmbunătățirii performanțelor hidrodinamice ale unei carene date a fost și este una dintre provocările, la care, colective de cercetare de renume mondial încearcă să răspundă de mai bine de un secol.

Trebuie menționat, în acest context, primul bazin de încercări experimentale construit de Froude, în anul 1871, în curtea casei sale de lângă Torquay. Acesta fost primul pas făcut în sensul investigării experimentale a câmpului de curgere din jurul carenei navale, precum și în direcția determinării, prin măsurători la scară, a mărimilor care definesc performanțele hidrodinamice ale acesteia.

Deși extrem de eficiente, metodologiile de tip *Experimental Fluid Dynamics (EFD)*, abreviere în engleză) sunt mari consumatoare de timp și bani fapt care justifică implementarea hidrodinamicii numerice în direcția soluționării problemelor de hidrodinamică navală. Această tehnică este cunoscută, pe plan mondial, sub denumirea de *Computational Fluid Dynamics (CFD)*, abreviere în engleză).

Această *“a treia dimensiune”* (Anderson, 1995) a dinamicii fluidelor este folosită, în condițiile prezentei cercetări, pentru a realiza studiul curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice și cârmă. Pe fondul investigării numerice a câmpului de viteze și presiuni, este considerată validarea metodologiilor de tip *CFD* utilizate, o alternativă computațională a testelor experimentale de rezistență la înaintare și propulsie, precum și a testelor statice de manevrabilitate cu mecanismul de mișcări plane (*PMM*, abreviere în engleză) fiind, de asemenea, prezentată.

### I.1. Justificarea abordării temei

Subiect de actualitate, studiul curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice și cârmă deschide hidrodinamicianului naval orizonturi largi și nebănuite, o multitudine de direcții de cercetare părănd a se contura sub condeiul acestei teme de interes mondial a cărei necesitate este evidențiată de

primele rânduri ale “Circularei 683” emisă, în anul 2009, de *The Marine Environment Protection Committee (MEPC, abreviere în engleză)*–comitet din cadrul *IMO* ce are ca principal obiectiv “prevenirea și controlul poluării mediului marin de către nave”. Astfel, un procent de 90% din comerțul global este realizat de către cele aproximativ 70000 de nave implicate, la nivel mondial, în acest tip de activitate comercială. Această realitate justifică considerarea acelor teme de cercetare care, prin soluțiile obținute, susțin îndeplinirea obiectivelor *IMO*: “transport pe apă, sigur și eficient, în oceane curate”.

De asemenea, introducerea, de către *IMO* a indicelui de proiectare pentru eficiență energetică–*Energy Efficiency Design Index (EEDI, abreviere în engleză)*, pentru navele nou construite, precum și a planului de management pentru eficiența energetică a navelor–*Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP, abreviere în engleză)*, pentru toate navele construcții noi sau deja aflate în exploatare, subliniază necesitatea realizării studiului curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice și cârmă. Introspecția fenomenelor turbulente care se desfășoară în jurul carenei navale devine, în aceste condiții, o necesitate. Determinarea soluțiilor de reducere a *EEDI* este puternic dependentă de identificarea și analiza acestora.

Astfel, pe baza studiului hidrodinamic al distribuțiilor de viteze și presiuni din jurul navei prevăzute cu elice și cârmă, zonele problematice ale curgerii pot fi aflate. În aceste condiții, o serie de soluții se pot dezvolta și implementa în direcția creșterii eficienței propulsiei, a reducerii consumului de combustibil și, în mod implicit, a diminuării emisiilor de dioxid de carbon.

De asemenea, investigarea, prin metode de tip *CFD*, a curgerii în jurul carenei navale, precum și determinarea mărimilor care pot da o măsură a performanțelor hidrodinamice ale acesteia este cu atât mai tentantă cu cât tehnicile numerice utilizate în această direcție fac obiectul unor workshopuri pe probleme de *CFD* în hidrodinamica navală.

În concluzie, se poate afirma că prezenta cercetare doctorală consideră un subiect al momentului. Orice rezultat obținut cu acuratețea impusă unui astfel de studiu de metodele de verificare și validare existente este, în aceste condiții, o contribuție în domeniu.

## I.2. Obiective ale cercetării. Metodologie de studiu

Având ca principală direcție de cercetare studiul curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice și cârmă, prezenta lucrare furnizează rezultatele obținute în sensul soluționării numerice a curgerii care definește spațiul de manevră a navei. Obiectivele centrale ale tezei de doctorat sunt:

- validarea metodologiilor de tip *CFD* utilizate în direcția investigării câmpului tridimensional de curgere din jurul carenei navale;
- studiul hidrodinamic al curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice și cârmă, la navigația pe drum drept, cât și în timpul unei situații de manevră;
- validarea tehnicilor de tip *CFD* utilizate în sensul determinării rezistenței la înaintare a carenei considerate;
- validarea tehnicilor de tip *CFD* utilizate în sensul determinării coeficienților de propulsie ai carenei în studiu;
- validarea tehnicilor de tip *CFD* utilizate în sensul determinării forței laterale și a momentului hidrodinamic pe corpul navei;
- elaborarea, pe baza metodologiilor de tip *RANS*, a unui set complet de teste de tip *PMM* static.

Direcțiile de cercetare, trasate pentru îndeplinirea obiectivelor definite, sunt:

- studiul curgerii în jurul carenei nude;
- studiul curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice;
- studiul curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice și cârmă.

În ceea ce privește metodologia de studiu, investigarea numerică a curgerii vâscoase făcută, în condițiile actualei cercetări, atât în ipoteza situării navei pe drum drept, precum și în ipoteza existenței unui unghi de derivă și/sau a unui unghi de cârmă, are la bază utilizarea unui solver de tip Reynolds Averaged Navier Stokes (*RANS, abreviere în engleză*). Asigurând închiderea sistemului de ecuații de mișcare, modelul de turbulență *Explicit Algebraic Stress Model (EASM, abreviere în engleză)* este folosit cu scopul de a determina fenomenele turbulente ce se dezvoltă în spațiul de curgere

tridimensională considerat, corecta formulare a condițiilor la limită făcând posibilă obținerea valorilor, mediate în timp, ale vitezei, presiunii, energiei cinetice turbulente și frecvenței turbulente.

Discretizarea, în direcția obținerii unei forme algebrice simplificate, a ecuațiilor diferențiale cu derivate parțiale care descriu curgerea fluidului, în interiorul domeniului de calcul, are la bază aplicarea *Finite Volume Method* (*FVM*, abreviere în engleză). O abordare de tip “*body force*” este utilizată pentru a reda efectul activ al propulsorului considerat pe baza modelului teoretic al liniei portante.

### I.3. Stadiul actual al cunoașterii

Studiul numeric al curgerii care se dezvoltă în jurul corpului navei echipate cu elice și cârmă este, în stadiul actual al cunoașterii, un subiect de actualitate, evoluția tehnicilor *RANS*, precum și gradul ridicat de maturitate atins de modelele de turbulență din ce în ce mai complexe și mai sofisticate permițând realizarea unei analize numerice scrupuloase a fenomenelor care întrețin câmpul de curgere din jurul corpului navei în mișcare. Abordarea acestui subiect cu multiple valențe științifice poate fi făcută dintr-o multitudine de perspective.

Se poate afirma că, în domeniul hidrodinamicii navale, evoluția tehnicilor de tip *CFD* începe odată cu anii '60, fiind evidențiate două direcții principale de cercetare și dezvoltare definite de metodele de tip potențial, respectiv de metodele de tip vâscos. În anul 2000, workshopul pe probleme de hidrodinamică numerică de la Gothenburg consemnează “*apogeul*” tehnicilor de tip potențial.

Pe parcursul anilor '80-'90 apar metodologiile de tip *RANS*, o serie de colective de cercetare de renume mondial (Larsson *et al.*, 1991) acționând în direcția dezvoltării și implementării acestora. Deși suficient de precise, în ceea ce privește calculul câmpului de viteze și presiuni, tehnicile elaborate în această perioadă nu și-au dovedit eficiența în a surprinde fenomenele turbulente care însoțesc procesul de curgere tridimensională din jurul carenei navale. Se impune, astfel, elaborarea și implementarea unor noi tipuri de modele de turbulență, mult mai complexe, care să poată surprinde apariția și evoluția formațiunilor de tip vortical. Această direcție este justificată și de rezultatele “*SSPA-CTH-IIHR Workshop on Ship Viscous Flow*” organizat la Gothenburg, în 1990.

De asemenea, dată fiind lipsa de informații în ceea ce privește stabilitatea, consistența și convergența soluțiilor ecuațiilor *RANS*, *ITTC* atrage atenția asupra necesității dezvoltării unor metodologii, precise, de verificare și validare a codurilor *CFD*.

În cadrul “*CFD Workshop Tokyo 1994*”, Sotiropoulos și Patel aduc în prim plan modelele de tip *RSM*. Concomitent cu această nouă clasă de modele de turbulență, apar și se dezvoltă și așa numitele *Algebraic Stress Models* (*ASM*, abreviere în engleză) (Gatski și Speziale, 1993).

La *Gothenburg 2000*, numai trei dintre cele peste 20 de metode prezentate aveau la bază modele de acest gen fiind evidențiată, astfel, necesitatea continuării cercetărilor în acest domeniu extrem de vast și complicat al modelării turbulenței. Pe lângă noutatea considerării unor forme actuale de navă, workshopul de la Gothenburg aduce în lumina reflectoarelor metodologiile de verificare și validare a metodelor de tip *CFD*. Procedura elaborată de Stern *et al.* (2001 a, 2001 b) este utilizată, pentru prima dată, de șapte dintre cele douăzeci de organizații prezente.

Atenția cercetătorilor este, astfel, direcționată spre implementarea, în procesul de investigare numerică a curgerii, a acestei etape de maximă importanță. De asemenea, utilitatea considerării unor condiții suplimentare de curgere date de prezența unui unghi de derivă nenu sau de interacțiunea corp-elice se numără printre direcțiile de cercetare trasate, în cadrul aceluiași workshop.

La “*CFD Workshop Tokyo 2005*”, se remarcă acuratețea cu care metodele prezentate reușesc să surprindă performanțele de propulsie ale navei, precum și evoluția pe care forțele și momentele hidrodinamice pe corpul navei o înregistrează în prezența unui unghi de derivă. Neconcordanțele *EFD-CFD* sunt, în continuare, datorate densității nesatisfăcătoare a rețelei de discretizare sau alegerii unui model de turbulență neadecvat.

Pe fundalul științific al aceluiași “*CFD Workshop Tokyo 2005*”, precum și în contextul lucrărilor prezentate de hidrodinamicienii de la *IIHR*, se poate observa complexitatea în creștere a cazurilor de studiu. Simpla analiză a curgerii în jurul carenei nude este înlocuită de prezența activă a propulsorului, cât și de considerarea geometriei cârmei. Încă un plus de dificultate este adăugat prin angajarea navei într-o mișcare de manevră.



Se remarcă, astfel, două mari direcții de studiu: o direcție dată de continuarea cercetărilor în sensul dezvoltării și implementării solverelor de tip *CFD* pentru determinarea, cu precizie, a performanțelor de rezistență la înaintare și propulsie, precum și pentru investigarea câmpului de viteze și presiuni din jurul navei echipate cu elice, cârmă sau diverși apendici și o direcție reprezentată de studiul manevrabilității navei. Predecesor anului 2005, este abordată validarea codurilor numerice de simulare și investigare a câmpului tridimensional de curgere care descrie spațiul de manevră a carenei, cât și de calcul al forțelor și momentelor hidrodinamice pe corpul navei.

În aceste condiții, s-a prognozat necesitatea organizării unui workshop pe probleme de verificare și validare a metodelor de tip *CFD* utilizate în analiza manevrabilității navei. S-a evidențiat necesitatea existenței unor seturi de date experimentale care să poată contribui la validarea acestui gen de metodologii computaționale de investigare hidrodinamică a curgerii în jurul carenei navale, în timpul unei mișcări de manevră, și de determinare a forțelor și momentelor hidrodinamice pe corpul navei. Apare, astfel, ideea organizării *SIMMAN 2008*, navele *KCS*, *KVLCC1*, *KVLCC2* și *DTMB 5415* fiind date în studiu în direcția simulării și investigării, pe baza unor unelte de tip *CFD*, a unui număr de mișcări impuse, precis controlate, corespunzătoare testelor de manevrabilitate cu mecanismul de mișcări plane.

Conform concluziilor publicate de echipa de organizatori ai *SIMMAN 2008*, treisprezece organizații *ITTC*, din zece țări diferite, au trimis, în vederea validării metodologiilor numerice utilizate în procesul de simulare a mișcărilor statice controlate, rezultatele computaționale obținute pentru cele trei modele de navă considerate.

Evidențiind faptul că metodele de tip *RANS* pot fi o alternativă fiabilă a testelor de tip *PMM*, rezultatele de tip *CFD* furnizate în raport cu simularea mișcărilor de manevră au fost, totuși, prea puține la număr nepermițând trasarea unor concluzii definitive vis-à-vis de implementarea acestor tehnici în direcția determinării performanțelor de manevrabilitate ale navei. De asemenea, nivelurile diferite de concordanță existente între soluțiile redată numeric și rezultatele determinate experimental, confirmă necesitatea realizării unui studiu mult mai complex care să cuprindă un set cât mai bogat de rezolvări de tip *CFD*.

În contextul organizării *Gothenburg 2010*, capacitățile solverelor de tip *CFD*, în materie de determinare a performanțelor de rezistență la înaintare și propulsie ale unei nave date, precum și capacitatea acestora de a surprinde influența pe care prezența activă a cârmei sau a propulsorului o induce în câmpul tridimensional de curgere din jurul unei carene date au fost pe larg analizate. O imagine clară a metodologiilor computaționale utilizate în sensul investigării hidrodinamicii curgerii turbulente în jurul navei cu sau fără apendici pare a se contura la finalul acestui workshop.

Este evident faptul că, în contextul științific internațional al ultimelor două decenii, cercetarea în domeniul hidrodinamicii computaționale a luat avânt, metodele *CFD* de studiu al curgerii vâscoase tridimensionale care se dezvoltă în jurul corpului navei echipate cu elice și cârmă devenind o unealtă incontestabilă de pătrundere și înțelegere a fenomenelor fizice care descriu spațiul de manevră a acesteia. Colective de hidrodinamicieni de renume mondial acționează în direcția dezvoltării și implementării metodologiilor de tip *RANS* ca o alternativă numerică robustă și fiabilă a testelor experimentale de rezistență la înaintare, autopropulsie și manevrabilitate, precum și ca un instrument valid de studiu al curgerii turbulente care definește interacțiunea corp–elice–cârmă.

Astfel, având ca principală direcție de cercetarea studiul curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice și cârmă, prezenta lucrare științifică îmbină rezultatele computaționale obținute în procesul de investigare numerică a curgerii incidente care se dezvoltă în jurul configurațiilor de studiu date de carena nudă, nava echipată cu elice și nava echipată cu elice și cârmă, prezentând, pentru fiecare dintre cele trei sisteme analizate, mărimile hidrodinamice de interes.

Considerând verificarea prealabilă a soluțiilor de tip *CFD* obținute în corespondența ansamblurilor studiate, incertitudinile numerice fiind determinate pe baza realizării, pentru fiecare configurație dată, a unui studiu de grilă, lucrarea de față conține o serie de rezultate științifice care, prin nota de originalitate pe care o relevă, pot contribui la o mai bună înțelegere a fenomenelor ce descriu câmpul tridimensional de curgere din jurul unei carene date.

Teza își propune să ofere o imagine a capacităților pe care tehnicile de tip *CFD* utilizate le oferă în contextul simulărilor realizate fiind prezentate atât performanțele, cât și deficiențele acestora. Scopul acestei lucrări nu este acela de a furniza cele mai bune soluții ci acela de a evidenția gradul de

dezvoltare a tehnicilor de tip *RANS*, respectiv de a susține, prin rezultatele prezentate, o viitoare implementare a acestora în cadrul procesului de proiectare asistată.

Pas important în studiul curgerii în jurul navei echipate cu elice și cârmă, validarea metodologiei aplicate a impus, pentru realizarea actualei cercetări, alegerea unei nave benchmark.

#### I.4. Benchmarking

Proiectată de *MOERI* cu scopul de a furniza o serie de date experimentale care să poată fi utilizate în sensul validării codurilor de tip *CFD* pe probleme de rezistență la înaintare, propulsie și manevrabilitate, carena *KVLCC* este caracterizată de formele pline specifice clasei de nave din care face parte. Bulburile prova, respectiv pupa definesc geometria complicată, generatoare de gradienti mari de viteză și presiune, a navei în studiu.

În lucrarea de față a fost considerată a doua variantă a tancului *KVLCC–KVLCC2*. Opțiunea pentru aceasta este motivată de intenția unei introspecții detaliate a câmpului de curgere care se dezvoltă în jurul acestui gen de navă, în condițiile geometrice descrise de existența unei forme pupa de tip U.

Forma navei *KVLCC2* este evidențiată în figura I.1, tabelul I.1 prezentând dimensiunile navei *KVLCC2*, cât și dimensiunile modelului de la *MOERI*. Rezultatele furnizate de către aceștia, la *SIMMAN 2008*, sunt utilizate în direcția validării soluțiilor computaționale obținute pe baza metodologiei numerice considerate în cadrul prezentei teze de doctorat.



**Figura I.1.** *KVLCC2* (<http://www.nmri.go.jp/cfd/cfdws05/index.html>)

Tabelul I.1. Dimensiuni principale <i>KVLCC2</i>			
Dimensiune	Unitate de măsură	Nava la natură	Nava la scara <i>MOERI</i> (1:58)
Lungime între perpendiculare, $L_{PP}$	m	320	5.5172
Lățime, $B_{WL}$	m	58	1.000
Pescaj, $d$	m	20.8	0.3586
Deplasament volumetric, $\nabla$	m <sup>3</sup>	312635	1.6023
Suprafața udată a carenei nude, $S_{WL}$	m <sup>2</sup>	27257	8.0838
Coeficientul bloc, $c_B$	–	0.81	0.81

Esențializând, se poate afirma că lucrarea de față se încadrează în contextul științific internațional al implementării tehnicilor de tip *CFD* pentru descrierea performanțelor hidrodinamice de rezistență la înaintare, propulsie și manevrabilitate ale unei nave date, fiind motivată de necesitatea descrierii fenomenelor care iau naștere și se dezvoltă în jurul unei carene echipate cu elice și cârmă atunci când aceasta navigă pe drum drept sau execută o mișcare de manevră.

## Capitolul II

### Model matematic

Modelarea matematică a curgerii vâscoase are la bază ecuațiile fundamentale ale dinamicii fluidelor, ecuația de continuitate, respectiv ecuațiile Navier–Stokes. Un solver de tip de tip *RANS* este utilizat cu scopul de a realiza studiul curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice și cârmă. Calculul propulsiei presupune, pentru elice, o abordare de tip “*body force*” solverul utilizat fiind cuplat cu o metodă ce are la bază modelul teoretic al liniei portante. În conformitate cu aceasta, în primă aproximație, elicea cu număr finit de pale este substituită cu o elice cu un număr mare (practic infinit) de pale extrem de subțiri, repartizate uniform pe discul elicei.

#### I.1. Ecuațiile de guvernare ale curgerii vâscoase

În spatele tuturor programelor sau tehnicilor de analiză numerică a curgerii, stau ecuațiile fundamentale ce guvernează dinamica fluidului a căror formă diferențială, scrisă pentru un fluid incompresibil, este:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \mathbf{U} = 0 \\ \underbrace{\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t}}_{\substack{\text{forțe unitare} \\ \text{locale de inerție}}} + \underbrace{\mathbf{U} \cdot \nabla \mathbf{U}}_{\substack{\text{forțe unitare} \\ \text{convective de inerție}}} = \underbrace{\mathbf{f}}_{\substack{\text{forțe masice} \\ \text{unitare}}} - \underbrace{\frac{1}{\rho} \nabla p}_{\substack{\text{forțe unitare} \\ \text{de presiune}}} + \underbrace{\nu \Delta \mathbf{U}}_{\substack{\text{forțe de frecare} \\ \text{vâscoase unitare}}} \end{array} \right. \quad (\text{II.1})$$

$\mathbf{U}(u, v, w)$  este vectorul viteză,  $t$  este timpul,  $\rho$  este densitatea fluidului,  $p$  este presiunea, iar  $\nu$  este vâscozitatea cinematică a fluidului.

Astfel, cuplate cu ecuația de continuitate, ecuațiile de conservare a impulsului formează un sistem de ecuații diferențiale cu derivate parțiale care, scris în coordonate carteziene, are următoarea formă:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = X - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = Y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = Z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{array} \right. \quad (\text{II.2})$$

Deși rezolvarea sistemului (II.2) redă soluția analizei numerice a câmpului tridimensional de curgere vâscoasă din jurul carenei navale gradul de neliniaritate al ecuațiilor face ca procesul de

soluționare a problemei să fie unul dificil sau chiar imposibil. În acest context, este preferată abordarea numerică a acesteia. Astfel, au fost dezvoltate o serie de solvece care încorporează ecuațiile de mișcare.

În cazul curgerii turbulente, pentru care rezolvarea numerică a ecuațiilor Navier–Stokes este dificilă, solvecele de tip *CFD* folosesc ecuațiile de mișcare ale fluidului mediate în timp, mai exact ecuațiile *RANS*. Procedura de mediere în sens Reynolds, aplicată ecuațiilor instantanee Navier–Stokes, face o separare a variabilelor curgerii (viteză, presiune) într-o componentă mediată în raport cu timpul și o componentă pulsatorie. Scrise în funcție de componentele medii și fluctuante ale vitezei și prelucrate matematic, ecuațiile (II.2) ajung la o formă finală care redă, de fapt, ecuațiile *RANS* (II.3):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + w \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = \\ = X - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu \Delta \bar{u} + \frac{1}{\rho} \cdot \left[ \frac{\partial (-\rho \bar{u}'u')}{\partial x} + \frac{\partial (-\rho \bar{u}'v')}{\partial y} + \frac{\partial (-\rho \bar{u}'w')}{\partial z} \right] \\ \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + w \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} = \\ = Y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \nu \Delta \bar{v} + \frac{1}{\rho} \cdot \left[ \frac{\partial (-\rho \bar{v}'u')}{\partial x} + \frac{\partial (-\rho \bar{v}'v')}{\partial y} + \frac{\partial (-\rho \bar{v}'w')}{\partial z} \right] \\ \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + w \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = \\ = Z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \nu \Delta \bar{w} + \frac{1}{\rho} \cdot \left[ \frac{\partial (-\rho \bar{w}'u')}{\partial x} + \frac{\partial (-\rho \bar{w}'v')}{\partial y} + \frac{\partial (-\rho \bar{w}'w')}{\partial z} \right] \end{array} \right. \quad (\text{II.3})$$

Ultimul termen al celui de-al doilea membru al ecuațiilor Reynolds reprezintă forțele unitare datorate pulsațiilor turbulente, produsele dintre componentele medii ale vitezei de pulsație și densitatea fluidului fiind așa numitele eforturi “aparente” ale mișcării turbulente (Wilcox, 1994). Eforturile “aparente” pot fi exprimate pe baza tensorului tensiunilor Reynolds definit de matricea:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{yz} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_{yy} & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\rho \bar{u}'u' & -\rho \bar{u}'v' & -\rho \bar{u}'w' \\ -\rho \bar{v}'u' & -\rho \bar{v}'v' & -\rho \bar{v}'w' \\ -\rho \bar{w}'u' & -\rho \bar{w}'v' & -\rho \bar{w}'w' \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

Analiza sistemului (II.3) evidențiază un număr de zece necunoscute date de presiunea,  $p$ , componentele  $u$ ,  $v$ ,  $w$  ale vectorului viteză  $\mathbf{U}$  și cele șase eforturi Reynolds:  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$ ,  $\tau_{yx} = \tau_{xy}$ ,  $\tau_{zx} = \tau_{xz}$ ,  $\tau_{zy} = \tau_{yz}$ . Dat fiind că, sistemul considerat are un număr de patru ecuații devine evident faptul că procedura de mediere în sens Reynolds conduce la apariția unor termeni suplimentari introducând, în acest fel, o problemă de “*inchidere*”. Pentru soluționarea acesteia se impune alegerea și utilizarea unui număr adițional de ecuații, mai exact, a unui model matematic al turbulenței.

### II.1.1. Modelarea turbulenței

În cazul ecuațiilor *RANS*, utilizate pentru a realiza studiul curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice și cârmă, turbulența–aceea mișcarea tridimensională aparent aleatorie și haotică a particulelor unui fluid ce domină, prin prezența ei, toate celelalte fenomene ale curgerii și are ca efect

o creștere a pierderilor de energie și a rezistenței, își pune amprenta asupra componentelor medii ale vitezei și presiunii prin intermediul tensiunilor Reynolds,  $-\rho \overline{u_i' u_j'}$ .

Devine, astfel, absolut necesară alegerea și utilizarea corectă a acelor modele matematice care să pot surprinde cu maximum de precizie fenomenele mai mult sau mai puțin turbulente ce se dezvoltă în spațiul de curgere tridimensională considerat. Cunoscute sub numele de modelele de turbulență, ecuațiile care fac posibilă închiderea sistemului (II.3) sunt de diferite tipuri. Alegerea lor este dependentă de o serie de factori precum problema de curgere studiată, gradul de precizie a rezultatelor, resursele computaționale sau timpul avut la dispoziție pentru efectuarea calculelor.

Modelul *EASM*, model sofisticat al tensiunilor Reynolds, prezintă avantajul faptului că, datorită complexității lui, poate surprinde, cu suficientă precizie, intensitatea și structura formațiunilor vorticale, ce își găsesc originea în zona de gurnă a navei. Acest fapt justifică utilizarea *EASM* în sensul realizării prezentei cercetări.

### II.1.1.1. Modelul de turbulență EASM

Introducând o serie de termeni neliniari–modelul de turbulență *EASM* soluționează problema de tip “closure”, tensiunile Reynolds fiind explicit determinate din funcțiile tensoriale ale gradientilor vitezei, energiei cinetice turbulente și scării lungimilor turbulente.

Astfel, dacă pentru modelele de tip “linear eddy viscosity” tensorul tensiunilor Reynolds,  $\tau_{ij}$ , este, conform relației lui Boussinesq, definit de multiplicarea vâscozității cinematice turbulente,  $\nu_T$ , cu gradientii vitezei (Davidson, 2011) la care, pentru a considera și contracția fluidului, se adaugă termenul  $\frac{2}{3}k\delta_{ij}$ , în cazul modelului *EASM* o serie de termeni neliniari sunt introduși,  $\tau_{ij}$  fiind exprimat prin egalitatea (II.5) (Ismail, 1999).

$$\begin{aligned} \tau_{ij} = & \frac{2}{3}k\delta_{ij} - 2C_{\mu}^* \frac{k^2}{\varepsilon} S_{ij} - \beta_1 \frac{k^3}{\varepsilon^2} (S_{ij}\Omega_{kj} + S_{jk}\Omega_{ki}) + \\ & + \beta_2 \frac{k^3}{\varepsilon^2} \left( S_{ik}S_{kj} - \frac{1}{3}S_{mn}S_{mn}\delta_{ij} \right) \end{aligned} \quad (II.5)$$

În ecuațiile considerate,  $i$  și  $j$  sunt indicii ce dau direcțiile după care se face derivarea,  $k$  este energia cinetică turbulentă,  $\varepsilon$  este disiparea energiei cinetice turbulente,  $\delta_{ij}$  este operatorul lui Kronecker,  $S_{ij}$  este rata de deformație a tensiunilor, iar  $\Omega_{ij}$  este rata de rotație a tensiunilor.

Deși gradul ridicat de complexitate care îl definește transformă modelul de turbulență *EASM* într–un mare consumator de timp și de resurse computaționale, acesta prezintă, totuși, pe lângă capacitatea de a surprinde, în mod corect, caracterul turbulent al curgerii în studiu, și avantajul unic al faptului că poate furniza, pentru fiecare iterație efectuată, valoarea explicită a tensiunilor Reynolds. Stabilirea condițiilor la limită este următorul pas necesar investigării numerice a curgerii.

### II.1.2. Condiții la limită

O formulare adecvată a condițiilor la limită–constrângeri matematice ale ecuațiilor de conservare care, impuse pe frontierele geometrice ale domeniului de calcul, pot da o descriere conformă a stării fluidului în fiecare punct de curgere considerat, este absolut necesară atunci când se dorește modelarea numerică corectă a unei curgeri tridimensionale. Rezolvarea ecuațiilor diferențiale cu derivate parțiale care dau câmpul de viteze și presiuni ce se dezvoltă în jurul configurației corp–elice–cârmă este puternic condiționată de definirea judicioasă a acestora.

Condițiile la limită, de tip Neumann sau Dirichlet, impuse pe fiecare frontieră a spațiului tridimensional de calcul considerat, sunt formulate pentru viteză,  $\bar{u}$ , presiune,  $\bar{p}$ , energie cinetică turbulentă,  $k$ , și disipare specifică a energiei cinetice turbulente,  $\omega$ .

Astfel, pentru fluidul care intră în domeniu, prin frontiera din amonte, și curge în direcția navei care este un sistem fix, pe suprafața de intrare, *inflow* presupune:

$$\bar{u} = ct; \quad \frac{\partial \bar{p}}{\partial \zeta_B} = 0; \quad k = ct; \quad \omega = ct \quad (\text{II.6})$$

În mod similar, pe suprafața navei, *noslip* impune:

$$\bar{u} = 0; \quad \frac{\partial \bar{p}}{\partial \zeta_B} = 0; \quad k = 0; \quad \omega = f(u_\tau, \dots) \quad (\text{II.7})$$

Condiția *outflow*, declarată pe suprafața geometrică ce descrie frontiera prin care fluidul iese din domeniul computațional, presupune:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial \zeta_B} = 0; \quad \bar{p} = 0; \quad \frac{\partial k}{\partial \zeta_B} = 0; \quad \frac{\partial \omega}{\partial \zeta_B} = 0 \quad (\text{II.8})$$

Deoarece, pentru realizarea prezentei cercetări, efectul suprafeței libere a fost, în totalitate neglijat, o condiție la limită de tip *slip*, ce are la bază o abordare gen “*double model*”, este considerată:

$$\begin{aligned} \bar{un} = 0 \\ \frac{\partial \bar{u}}{\partial \zeta_B} = 0; \quad \frac{\partial \bar{p}}{\partial \zeta_B} = 0; \quad \frac{\partial k}{\partial \zeta_B} = 0; \quad \frac{\partial \omega}{\partial \zeta_B} = 0 \end{aligned} \quad (\text{II.9})$$

În ceea ce privește frontiera exterioară, aceasta este o frontieră liberă prin care fluidul trece fără a fi reflectat de celelalte limite artificiale ale domeniului de calcul, în timp ce, în cazul suprafeței laterale de simetrie babord–tribord valorile pentru viteză, presiune, energie cinetică turbulentă și frecvență turbulentă sunt obținute prin interpolare între cele două jumătăți ale domeniului de calcul, dispuse de-o parte și de alta a planului diametral.

Soluționarea problemei de curgere, considerate pentru cazul navei echipate cu elice și cârmă, presupune atât rezolvarea sistemului de ecuații care descrie curgerea vâscoasă, precum și soluționarea corectă a funcționării propulsorului.

### II.1.3. Modelarea elicei navale. Teoria liniei portante.

Descrierea matematică a curgerii turbionare care se dezvoltă în jurul elicei active este, fără îndoială, una dintre direcțiile principale de cercetare abordate în domeniul de vârf al hidrodinamicii elicelor navale. Formularea și dezvoltarea unor modele matematice precise care să surprindă fenomenele intens turbulente ce iau naștere și se dezvoltă în domeniul de funcționare a propulsorului are ca punct de plecare teoria impulsului axial inițiată de fizicianul englez Rankine în anul 1865. Această teorie complinită de Froude, în 1887, este îndeaproape urmată (1878) de teoria elementului de pală fundamentată de Froude și continuată de Taylor (1893) și Drzewiecki (1903). În 1919, teoria aripii de anvergură finită a lui Prandtl introduce modelele turbionare de calcul al elicei acestea înlocuind elicea cu o distribuție de vârtejuri libere și legate capabile să genereze performanțe hidrodinamice similare performanțelor dezvoltate de elicea reală.

Modelul teoretic al liniei portante înlocuiește, astfel, pala elicei cu o linie de vârtejuri legate a căror intensitate variază, atât în sens radial, cât și unghiular, în momentul funcționării elicei. Această distribuție variabilă a circulației generează vârtejuri libere transversale și longitudinale.

Faptul că prezenta cercetare științifică tratează problema curgerii în jurul navei echipate cu elice și cârmă abordând curgerea care se dezvoltă în zona pupa, în spațiul tridimensional de operare a propulsorului, precum și influența pe care prezența activă a acestuia o exercită asupra performanțelor hidrodinamice ale navei în studiu, justifică modelarea propulsorului pe baza modelului liniei portante.

#### II.1.3.1. Teoria liniei portante

Modelul liniei portante înlocuiește acțiunea palelor elicei cu un sistem de vârtejuri libere și legate. Vârtejurile legate, de intensitate variabilă în raport cu raza, sunt poziționate în lungul liniei portante, iar vârtejurile libere, reprezentând suprafața liniilor de curent ce apar ca rezultat al

combinării mișcării de avans cu mișcarea de rotație, sunt dispuse pe o suprafață elicoidală,  $S_e$ , situată în aval de elice.

Metoda folosită, în scopul discretizării ecuațiilor diferențiale cu derivate parțiale, este, în contextul utilizării SHIPFLOW, *FVM*.

#### II.1.4. Discretizarea ecuațiilor. Metoda Volumelor Finite

*FVM* consideră volume mici, de control, pentru care, în sensul soluționării ecuațiilor *RANS*, se impune conservarea masei și a impulsului. Aplicabilă pentru orice tip de grilă, metoda presupune, în cazul solverului XCHAP utilizat, poziționarea nodurilor de calcul în centrul de greutate al volumelor de control.

Este construită, în acest sens, rețeaua de discretizare care redă, prin liniile de grilă componente, conturul acelor suprafețe de control ce delimitează celulele considerate. Dificultatea generării acesteia este cu atât mai mare cu cât simulările numerice consideră nava echipată cu elice și cârmă. Devine, în aceste condiții, absolut necesară abordarea judicioasă a etapei de generare a “*mesh*”-ului.

### II.2. Domeniu de calcul. Rețea de discretizare

Rezolvarea curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice și cârmă depinde de alegerea corectă a limitelor geometrice ale domeniului tridimensional de calcul, precum și de generarea acelei rețele de discretizare care să acționeze în sensul determinării fenomenelor care apar și se propagă în câmpul de curgere, în cazul navei echipate cu elice și cârmă.

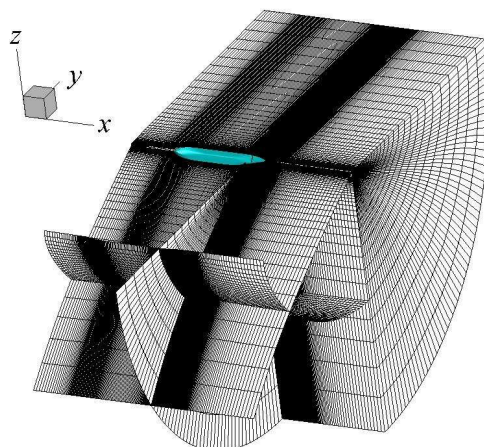


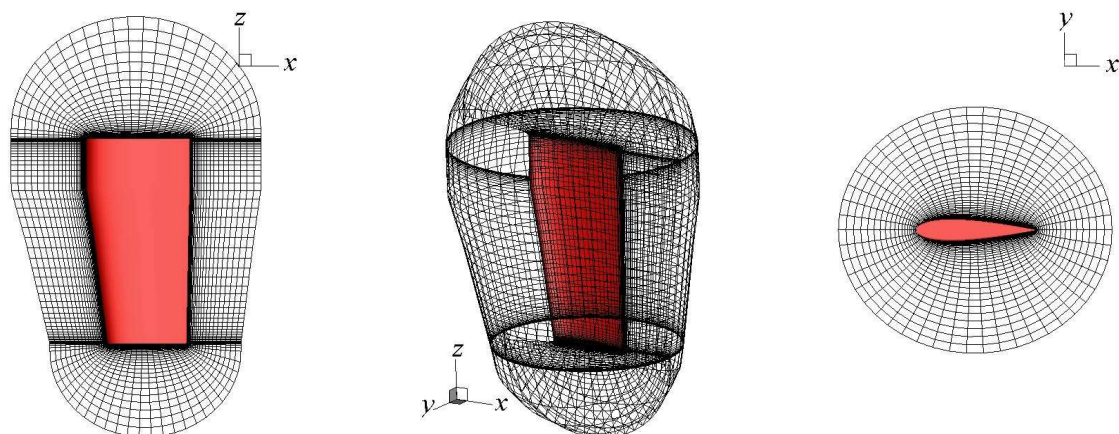
Figura II.1. Grilă de calcul

Pentru toate situațiile de studiu abordate în cadrul prezentei teze de doctorat, considerând lungimea între perpendiculare a navei egală cu unitatea, limitele domeniului de calcul s-au păstrat neschimbate fiind definite de  $0.5L_{pp}$  în amonte de navă, și  $1.0L_{pp}$  în aval de navă, pe direcție longitudinală, respectiv de  $3.0L_{pp}$ , pe direcție radială.

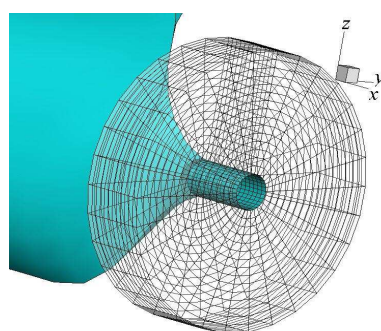
Cu scopul de a descrie complet spațiul tridimensional de curgere din jurul corpului navei model, a fost generată, utilizând o metodă eliptică bidimensională, o grilă structurată de tip monobloc cu aproximativ 2800000 de celule, (figura II.1).

Grila tridimensională de tip H-O este condensată în zona frontierei solide care descrie suprafața carenei, pe direcție longitudinală și radială. Este asigurată, în acest mod, densitatea necesară obținerii unor gradienti corecți de viteză și presiune, în zonele de interes.

Două grile de tip structurat au fost generate pentru a considera cârma (figura II.2) și elicea (figura II.3). Implementată în SHIPFLOW, tehnica suprapunerii grilelor este utilizată în sensul rezolvării situațiilor de curgere considerate pentru nava prevăzută cu elice și cârmă. În conformitate cu această tehnică de tip CHIMERA, grilele apendice pot fi amplasate oriunde în domeniu fiind, astfel, eliminată necesitatea redefinirii totale a rețelei de discretizare pe care o presupune utilizarea grilelor de tip bloc.



**Figura II.2.** Grilă de calcul cârmă



**Figura II.3.** Grilă de calcul elice

Implementată în sensul soluționării curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice și cârmă, prezenta metodologie numerică introduce, totuși, o serie de erori pentru a căror determinare este necesară considerarea unei metodologii de verificare. Aceasta este direcția de studiu abordată și în cadrul acestei lucrări de doctorat, “*ITTC Recommended Procedures and Guidelines*” (2002) fiind urmate. Astfel, pentru toate cele trei configurații în studiu, incertitudinea numerică este determinată.



## Capitolul III

# Verificare

Prin intermediul acestui capitol, sunt prezentate rezultatele numerice obținute pe parcursul procesului de verificare a tehnicilor *CFD* utilizate în studiul curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice și cârmă. Este, de asemenea, făcută o prezentare, în detaliu, a metodei *ITTC* de determinare a erorii numerice.

Știind că verificarea este “*acel proces de evaluare a incertitudinii simulării numerice ( $U_{SN}$ ) și, atunci când condițiile o permit, de estimare a semnului și magnitudinii erorii simulării numerice în sine și a incertitudinii acestei estimări ( $U_{ScN}$ )*” (Stern et al., 1999) și știind că validarea este “*acel proces de evaluare a incertitudinii modelării ( $U_{SM}$ ), folosind date experimentale, și, atunci când condițiile o permit, de estimare a semnului și magnitudinii erorilor de modelare ( $\delta_{SM}$ )*” (Stern et al., 1999), poate fi făcută o prezentare a metodologiei de verificare.

Astfel, plecând de la relația (III.1) în conformitate cu care eroarea de comparație *EFD-CFD*,  $E$ , este dată de diferența înregistrată între valorile determinate experimental,  $D$ , și cele determinate pe baza tehnicilor computaționale,  $S$ , validarea rezultatelor numerice se face pe baza analizei comparative  $E - U_V$ .  $U_V$  este incertitudinea validării, explicit definită de ecuația (III.2), în componența căreia intră și incertitudinea rezultatelor *EFD* –  $U_D$ .

$$E = D - S \quad (III.1)$$

$$U_V^2 = U_D^2 + U_{SN}^2 \quad (III.2)$$

Se poate concluziona că procedura în sine are ca rezultat scontat unica determinare a incertitudinii simulării numerice,  $U_{SN}$ , sau, atunci când condițiile o permit, unica determinare a incertitudinii semnului și magnitudinii erorii simulării numerice,  $U_{ScN}$ . Aceasta este direcția în care metodologiile de verificare sunt implementate.

Prezenta lucrare doctorală are la bază un studiu de convergență, procedura de verificare a rezultatelor numerice fiind, pe larg, descrisă de următorii pași:

- prezentarea obiectivelor și a condițiilor de curgere;
- alegerea numărului de grile și prezentarea parametrilor și a factorilor de rafinare considerați;
- prezentare metodologiei aplicate în sensul determinării incertitudinii erorii simulării numerice.

### III.1. Condiții de curgere

În condițiile actualei cercetări, sunt considerate verificarea și validarea soluțiilor numerice obținute pentru cazul carenei nude, al navei echipate cu elice și al navei echipate cu elice și cârmă. Pentru fiecare dintre cele trei configurații de interes, condițiile de modelare sunt descrise, în conformitate cu rezultatele *EFD* furnizate de *MOERI* la *SIMMAN 2008*, de considerarea unui număr Reynolds egal cu  $4.6 \times 10^6$ . Valoarea numărului Froude care definește curgerea în jurul navei model

$KVLCC2$  este egală cu 0.142–valoare suficient de mică ce permite neglijarea suprafeței libere a apei. Spre deosebire de condițiile experimentale ale celor de la *MOERI* care presupun, pentru modelul considerat, mișcări libere în plan vertical–longitudinal (asietă și afundare), pentru modelul virtual aceste grade de libertate sunt restricționate. Suplimentar, elicea funcționează la punctul de autopropulsie a navei la natură– $n = 8.59$  rps.

Pentru fiecare dintre cele trei configurații considerate (carenă nudă, navă echipată cu elice și navă echipată cu elice și cârmă), în condițiile de curgere prezentate, studiul de convergență aplicat în direcția verificării metodologiei numerice utilizate presupune utilizarea unui număr de cinci grile de calcul, de densitate diferită. Trei studii de grilă sunt, separat, realizate.

## III.2. Grile de studiu

Atât pentru carena nudă, nava echipată cu elice, cât și nava echipate cu elice și cârmă, raportul de rafinare a rețelei de discretizare este dat de  $r_G = \sqrt[4]{2}$ . În toate cazurile, densitatea celei mai fine grile este aceeași. Se poate, astfel, afirma că, pentru toate configurațiile în studiu, procedura de verificare presupune, pentru domeniul tridimensional de curgere din jurul corpului navei, utilizarea aceluiași cinci grile de calcul. Este modificată numai configurația în studiu, prin adăugarea elicei sau a ansamblului elice–cârmă, și incidența impusă a curentului, prin considerarea, în cazul corp–elice–cârmă, a combinației  $\beta = 9^\circ - \delta R = 30^\circ$ .

## III.3. Metodologie de verificare

Aplicată rezultatelor *CFD* obținute în cadrul procesului de verificare a studiului curgerii în jurul corpului navei echipate sau nu cu elice sau elice și cârmă, metodologia de verificare considerată presupune eroarea simulării numerice ca fiind sumă a erorilor care apar din calcul numeric iterativ,  $\delta_I$ , și a erorilor care țin de densitatea rețelei de discretizare,  $\delta_G$ . Calculul fiind staționar,  $\delta_r$ –eroarea datorată considerării pasului de timp, este neglijată. La fel și  $\delta_p$ –eroarea introdusă de alți parametri considerați în procesul de simulare de tip *CFD*, este anulată. Astfel, conform *ITTC* (2002):

$$\delta_{SN} = \delta_I + \delta_G \quad (III.3)$$

Corespunzător ecuației (III.10), ecuația incertitudinilor erorii simulării numerice este:

$$U_{SN}^2 = U_I^2 + U_G^2 \quad (III.4)$$

Este, așadar, evidențiată necesitatea determinării erorilor care apar din calcul numeric iterativ, cât și a erorilor introduse de rețeaua de discretizare.

### III.3.1. Determinarea $U_I$

Metodele de estimare a  $\delta_I$ , respectiv  $U_I$  sunt strict dependente de tipul de convergență pe care soluția, obținută ca rezultat al unui proces iterativ, îl prezintă. Acesta este contextul, în care, rezultatele calculului iterativ pot prezenta trei tipuri de manifestări convergent–iterative: un mod oscilatoriu, un mod convergent sau un mod mixt, oscilatoriu–convergent (Stern *et al.*, 1999). Pentru fiecare dintre cele trei situații prezentate,  $U_I$  poate fi determinată.

În condițiile prezentei cercetări, rezultatele numerice dovedesc un comportament iterativ oscilatoriu–convergent, relațiile (III.5), respectiv (III.6) fiind considerate în sensul determinării erorilor simulării numerice, cât și a incertitudinilor acestor erori.

$$\delta_I = S - \frac{1}{2}(S_U + S_L) \quad (III.5)$$

$$U_I = \left| \frac{1}{2}(S_U - S_L) \right| \quad (III.6)$$

$S_L$ , respectiv  $S_U$  sunt valorilor minime, respectiv maxime care definesc, în aceste condiții de convergență iterativă, limitele ultimei iterații.

### III.3.2. Determinarea $U_G$

Necesară fiind, concomitent cu determinarea erorii, respectiv a incertitudinii erorii numerice datorate calculului computațional iterativ, efectuarea unei analize a erorii, respectiv a incertitudinii numerice introduse, în soluția CFD, de către rețeaua de discretizare, metodologia de verificare presupune aplicarea unei proceduri matematice care să acționeze în acest sens al determinării  $\delta_G$ , respectiv  $U_G$ . Considerând trei grile succesive de calcul, diferențele înregistrate între soluțiile obținute numeric pe baza  $G_i$ , respectiv  $G_{i+1}$  și rezultatele determinate pe baza  $G_{i-1}$ , respectiv  $G_i$ , sunt utilizate pentru a afla ce tip de convergență înregistrează soluția:

$$R_{G_{i+1},i-1} = \frac{\varepsilon_{i,i-1}}{\varepsilon_{i+1,i}} \quad (\text{III.7})$$

Valoarea ratei de convergență,  $R_{G_{i+1},i-1}$ , dă măsura gradului de convergență:

- $0 < R_{G_{i+1},i-1} < 1$ —soluția este monoton—convergentă;
- $R_{G_{i+1},i-1} < 0$ —soluția este oscilator—convergentă;
- $R_{G_{i+1},i-1} > 1$ —soluția este divergentă.

Pentru fiecare dintre cazuri, determinarea  $\delta_G$ , respectiv  $U_G$  se face diferit.

#### III.3.2.1. Soluție monoton—convergentă

Dacă prima condiție de convergență este îndeplinită, metoda lui Richardson (Richardson, 1910) este aplicată, relația (III.10) fiind considerată în direcția soluționării erorilor de grilă.

$$\delta_{RE,G_{i-1}} = \frac{\varepsilon_{i,i-1}}{r_G^{pk_{i+1},i-1} - 1} \quad (\text{III.10})$$

#### III.3.2.2. Soluție oscilator—convergentă

În cel de-al doilea caz soluția este oscilator—convergentă, fapt care face posibilă unica estimare a incertitudinii numerice,  $U_{G_{i-1}}$ . Necesitând considerarea unui număr net superior celor  $m = 3$  rețele de discretizare, determinarea  $U_{G_{i-1}}$  se face pe baza relației:

$$U_{G_{i-1}} = \frac{1}{2}(S_U + S_L) \quad (\text{III.11})$$

#### III.3.2.3. Soluție divergentă

Redată de  $R_{G_{i+1},i-1} > 1$ , soluția divergentă nu poate fi folosită pentru a determina eroarea și/sau incertitudinea numerică din grilă, aceasta impunând reconsiderarea modului de generare a rețelei de discretizare, cât și acordarea unei atenții sporite convergenței iterative.

Aplicată pentru cazul carenei nude, al navei echipate cu elice și al navei echipate cu elice și cârmă, procedura de verificare prezentată evidențiază gradul de incertitudine numerică a rezultatelor computaționale.

### III.4. Verificare

Rezultatele obținute sunt prezentate pentru fiecare ansamblu în parte, incertitudinea simulării numerice fiind calculată pentru coeficientul rezistenței de frecare,  $c_F$ , al rezistenței de presiune vâscoasă,  $c_{pV}$ , cât și pentru coeficientul componente de vâscozitate— $c_V$ . De asemenea, forța laterală adimensională,  $Y'$ , și momentul adimensional de rotație în plan orizontal,  $N'$ , sunt considerate în cazul navei echipate cu elice și cârmă.

### III.4.1. Carena nudă

Tabelul III.1 prezintă, pentru cazul carenei nude, rezultatele metodologiei de verificare considerate, în raport cu determinarea  $c_F$ ,  $c_{PV}$  și  $c_V$ .

<b>Tabelul III.1.</b> Verificarea soluțiilor determinate, în raport cu $c_F$ , $c_{PV}$ , respectiv $c_V$ , pentru cazul carenei nude ( $\beta = 0^\circ$ )			
Mărime	$U_{I_1} \% S_{G_1}$	$U_{G_1} \% S_{G_1}$	$U_{SN_1} \% S_{G_1}$
$c_F$	0.045	1.104	1.105
$c_{PV}$	5.539	21.402	22.107
$c_V$	1.445	4.643	4.862

### III.4.2. Nava echipată cu elice

În ceea ce privește cazul de studiu al navei echipate cu elice, condițiile de curgere sunt aceleași ca și în studiul carenei nude. O turație a elicei egală cu 8.59 rps este, suplimentar, considerată. Tabelul III.2 prezintă rezultatele verificării calculului vâscos.

<b>Tabelul III.2.</b> Verificarea soluțiilor determinate, în raport cu $c_F$ , $c_{PV}$ , respectiv $c_V$ , pentru cazul navei echipate cu elice ( $\beta = 0^\circ$ )			
Mărime	$U_{I_1} \% S_{G_1}$	$U_{G_1} \% S_{G_1}$	$U_{SN_1} \% S_{G_1}$
$c_F$	0.045	1.087	1.101
$c_{PV}$	4.276	12.878	13.569
$c_V$	1.374	3.288	3.563

### III.4.3. Nava echipată cu elice și cârmă

Extrem de complex studiul curgerii în jurul corpului navei complet echipate impune, de asemenea, realizarea unei verificări riguroase a calculului numeric.

<b>Tabelul III.3.</b> Verificarea soluțiilor determinate, în raport cu $c_F$ , $c_{PV}$ , respectiv $c_V$ , pentru cazul navei echipate cu elice și cârmă ( $\beta = 9^\circ - \delta R = 30^\circ$ )			
Mărime	$U_{I_1} \% S_{G_1}$	$U_{G_1} \% S_{G_1}$	$U_{SN_1} \% S_{G_1}$
$c_F$	0.020	6.666	6.666
$c_{PV}$	1.352	0.837	1.590
$c_V$	0.635	3.106	3.170

Tabelul III.3 prezintă rezultatele obținute pentru coeficienții rezistenței la înaintare evidențiat fiind faptul că, prin comparație cu primele două cazuri, incertitudinea simulării numerice crește cu aproximativ cinci procente.

<b>Tabelul III.4.</b> Verificare a soluțiilor determinate, în raport cu $Y'$ , respectiv $N'$ , pentru cazul navei echipate cu elice și cârmă ( $\beta = 9^\circ - \delta R = 30^\circ$ )			
Mărime	$U_{I_1} \% S_{G_1}$	$U_{G_1} \% S_{G_1}$	$U_{SN_1} \% S_{G_1}$
$Y'$	2.166	3.787	4.362
$N'$	3.963	4.477	5.979

Tabelul III.4 furnizează  $U_{SN}$  pentru forța laterală adimensională,  $Y'$ , și momentul adimensional de rotație în plan orizontal,  $N'$ .

Vizând investigarea hidrodinamică a curgerii în jurul carenei nude, amplasate în curent incident, Capitolul IV prezintă rezultatele numerice obținute în cadrul acestui proces. Validarea distribuției de viteze axiale din planul discului elicei (Marcu și Lungu, 2011), precum și dintr-o serie de alte cinci planuri situate în amonte și în aval de acesta, validarea distribuției de presiuni pe corpul navei, precum și validarea, prin comparație numeric–experiment, a forței de rezistență la înaintare și a forțelor și momentelor hidrodinamice adimensionale pe corpul navei (Marcu și Obreja, 2012) oferă o imagine clară a acurateții rezultatelor.

# Capitolul IV

## Studiul curgerii în jurul carenei nude

Prezenta cercetare doctorală consideră, ca prim pas făcut în direcția studiului curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice și cârmă, analiza hidrodinamică detaliată a distribuției de viteze și presiuni din jurul carenei model *KVLCC2*. Determinarea coeficientului forței de rezistență la înaintare și a forței laterale adimensionale și momentului hidrodinamic adimensional pe corpul navei este făcută pentru toate cele șapte cazuri de derivă considerate.

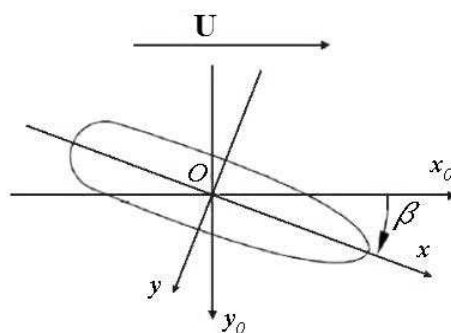
Lucrarea prezintă, prin intermediul acestui capitol, validarea metodologiei de calcul al siajului, precum și validarea, prin analiză comparativă numeric numeric–experiment, a metodologiei de calcul al mărimilor hidrodinamice de interes. Sunt prezentate soluțiile obținute pe baza investigării curgerii care se extinde, în sens longitudinal, de-a lungul carenei navale, la navigația pe drum drept sau în timpul unei mișcări de derivă.

### III.1. Condiții de modelare

Condițiile de modelare numerică sunt definite în concordanță cu metodologia experimentală abordată de *MOERI*, în cadrul testelor cu *PMM* static.

Astfel, “*teste pe model captiv*” probele experimentale gen “*derivă statică*” care implică utilizarea mecanismului de generare a mișcărilor plane presupun tractarea modelului experimental, cu viteză constantă, pe axa longitudinală a bazinului de manevrabilitate,  $x_0$ . Unghiul de derivă este, în acest caz, unicul parametru sistematic modificat (Obreja *et al.*, 2008). Natura statică a acestor teste este dată de faptul că mișcările armonice nu sunt, în nici un fel, considerate.

Figura IV.1 evidențiază poziția pe care modelul experimental, “*forțat să execute o mișcare impusă, precis controlată*” o are în timpul testelor de “*derivă statică*”.  $\beta$  este unghiul de derivă a carenei model.



**Figura IV.1.** “*Derivă statică*” (Manevrabilitatea Navei, Obreja D. C., Crudu L., Păcuraru S.)

Astfel, în concordanță cu testele experimentale cu *PMM* static realizate în bazinul de la *MOERI*, prezenta cercetare consideră pentru cazul de studiu al carenei nude amplasate în curent incident, modelul la scara 1:58 al navei *KVLCC2*. Determinat în raport cu 1.047 m/s-viteză a

modelului experimental, cu 5.5172 lungime între perpendiculare și cu 11.1 °C temperatură a apei în bazin numărul Reynolds este definit de  $4.6 \times 10^6$ .

Plecând de la valoarea calculată a numărului Froude și de la rezultatele experimentale prezentate în raport cu profilul suprafeței libere, respectiv cu înălțimea măsurată a valurilor carenei model *KVLCC2* de către Kim *et al.* (2001), simularea curgerii în jurul modelului virtual considerat se face în ipoteza neglijării suprafeței libere. În acest context rezistența de val propriu este nulă, rezistența totală la înaintare a carenei fiind dată de valoarea rezistenței de vâscozitate.

De asemenea, contrar condițiilor experimentale care presupun, pentru nava model *KVLCC2*, mișcări libere în plan vertical–longitudinal, studiul numeric este făcut în ipoteza restricționării acestor două grade de libertate.

Studiul curgerii în jurul carenei nude consideră următoarele direcții de cercetare:

- validarea metodologiilor de tip *CFD* utilizate la investigarea câmpului tridimensional de curgere din jurul carenei navale;
- studiul hidrodinamic al curgerii în jurul carenei nude, la navigația pe drum drept, cât și în timpul unei situații de manevră de tip “derivă statică”;
- validarea tehnicilor de tip *CFD* utilizate la determinarea rezistenței la înaintare a carenei nude;
- validarea tehnicilor de tip *CFD* utilizate la determinarea forțelor și momentelor hidrodinamice pe corpul navei, pentru cazul carenei nude.

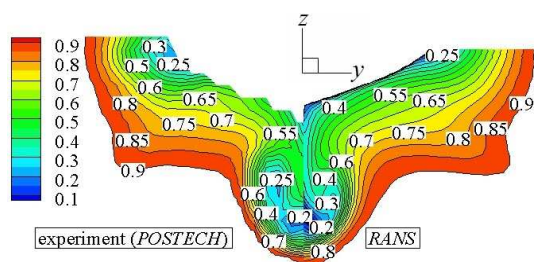
### III.2. Studiul hidrodinamic al curgerii în jurul carenei nude

Etapă extrem de importantă, analiza comparativă numeric–experiment este considerată atât pentru distribuția de viteze axiale, cât și pentru distribuția de presiuni pe corpul navei, în cazul de curgere definit de situarea navei pe drum drept.

#### IV.2.1. Validarea metodologiei de studiu al curgerii în jurul carenei nude

În conformitate cu rezultatele furnizate pentru *KVLCC2*, în cadrul *Gothenburg 2010*, prezentul studiu consideră, în procesul de analiză a distribuției de viteze axiale, un număr de patru planuri transversale. Suplimentar acestora, pe baza rezultatelor *EFD* prezentate de Kim *et al.* (2001), sunt abordate un număr de alte trei planuri transversale de studiu.

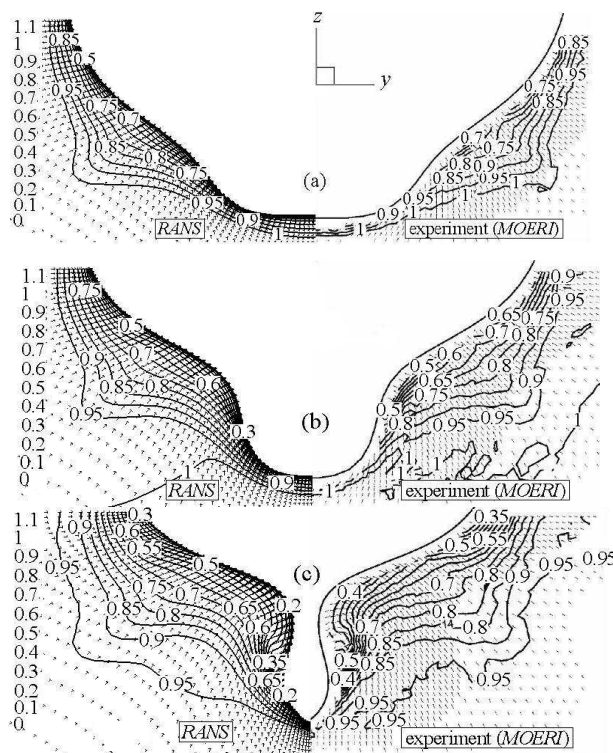
Rezultatele furnizate la *Gothenburg 2000* stau la baza validării distribuției de viteze axiale din planul discului elicei (figura IV.2).



**Figura IV.2.** Validarea distribuției de viteze axiale din planul discului elicei, la  $0.9825L_{pp}$ , pe baza rezultatelor experimentale *POSTECH* (2000)–vedere de la pupa spre prova (Marcu și Lungu, 2011)

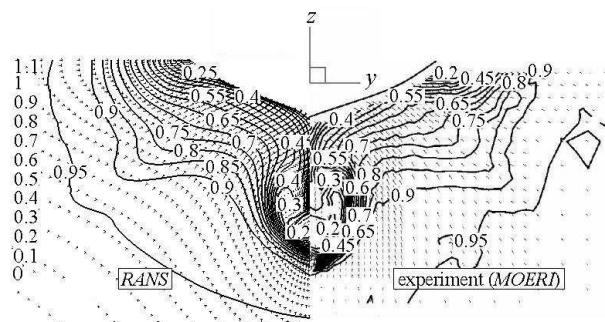
Rezultatele experimentale publicate, în “*Experiments in Fluids*”, de Kim *et al.* (2001) susțin această afirmație. Prezentând, în paralel, soluțiile obținute pe baza solverului de tip *RANS* și rezultatele determinate experimental, în bazinul de la *MOERI*, figura IV.3 redă distribuția de viteze axiale obținută în corespondența celor trei planuri de studiu, echidistant distribuite, în amonte de planul discului elicei, la  $0.85L_{pp}$ ,  $0.9L_{pp}$  și  $0.95L_{pp}$ .

Continuând analiza prin comparație a celor două tipuri de rezultate *EFD–CFD*, distribuția de viteze axiale din planul discului elicei este reluată în raport cu soluția experimentală furnizată de Kim *et al.* (2001) (figura IV.4).



**Figura IV.3.** Validarea distribuției de viteze axiale din planurile situate în amonte de discul elicei, la  $0.85L_{pp}$  (a),  $0.9L_{pp}$  (b),  $0.95L_{pp}$  (c), pe baza rezultatelor experimentale Kim *et al.* (2001)–vedere de la pupa spre prova

Similar primului caz de studiu, rezultatele numerice evidențiază o ușoară supraestimare a vitezei axiale în zona superioară a propulsorului, atât forma de “potcoavă”, cât și distribuția liniilor de contur fiind cu precizie estimate în restul domeniului de calcul.

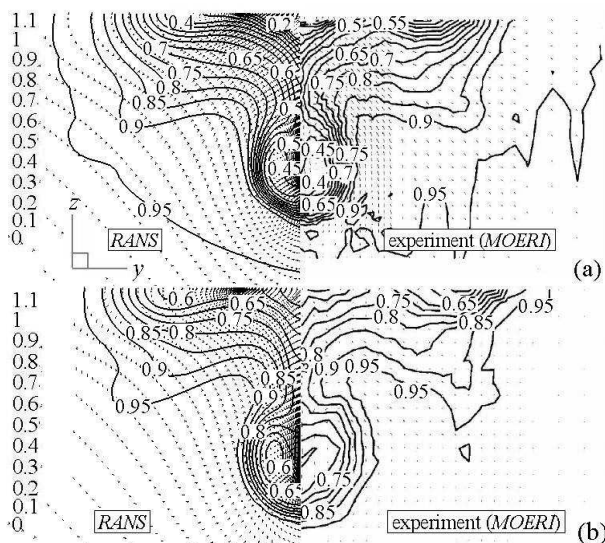


**Figura IV.4.** Validarea distribuției de viteze axiale din planul discului elicei, la  $0.9825L_{pp}$ , pe baza rezultatelor experimentale Kim *et al.* (2001)–vedere de la pupa spre prova

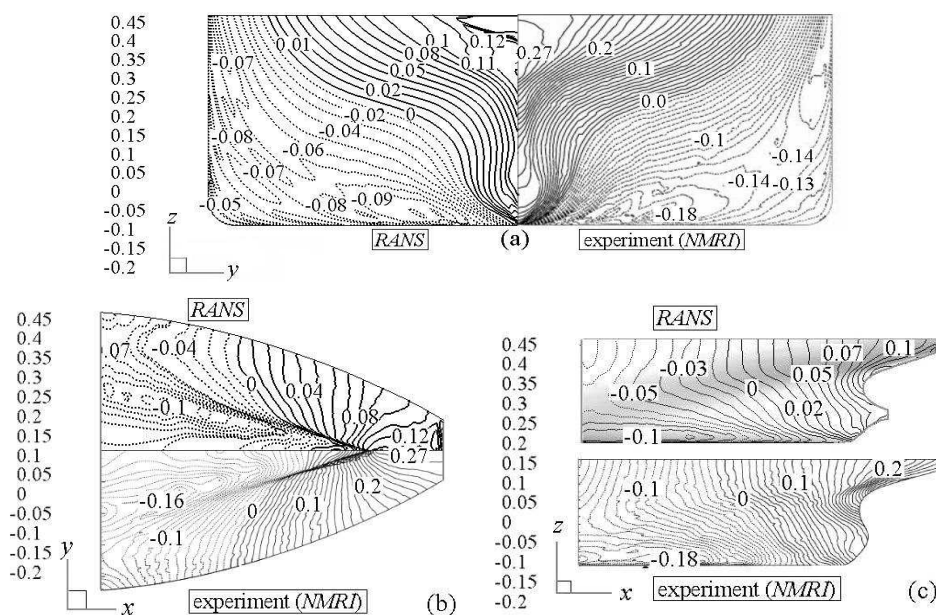
Persistând în direcția validării, prin analiză comparativă numeric–experiment, a distribuției de viteze axiale, două planuri de studiu, situate în aval de planul de funcționare a propulsorului, la  $1.0226L_{pp}$ , respectiv  $1.1L_{pp}$ , sunt considerate în conformitate cu rezultatele determinate experimental în bazinul de la MOERI (figura IV.5).

O analiză comparativ–calitativă este urmată în raport cu distribuția de presiuni pe corpul navei, rezultatele NMRI, prezentate pentru modelul experimental modificat KVLCC2M, fiind considerate în acest sens. Figura IV.6 prezintă, astfel, o paralelă a celor două tipuri de rezultate EFD–CFD evidențiind, prin distribuția similară a liniilor de contur ce dau valoarea distribuției de presiuni, capabilitatea solverului utilizat.





**Figura IV.5.** Validarea distribuției de viteze axiale din planurile situate în aval de discul elicei, la  $1.0226L_{PP}$  (a),  $1.1L_{PP}$  (b), pe baza rezultatelor experimentale Kim *et al.* (2001)–vedere de la pupa spre prova

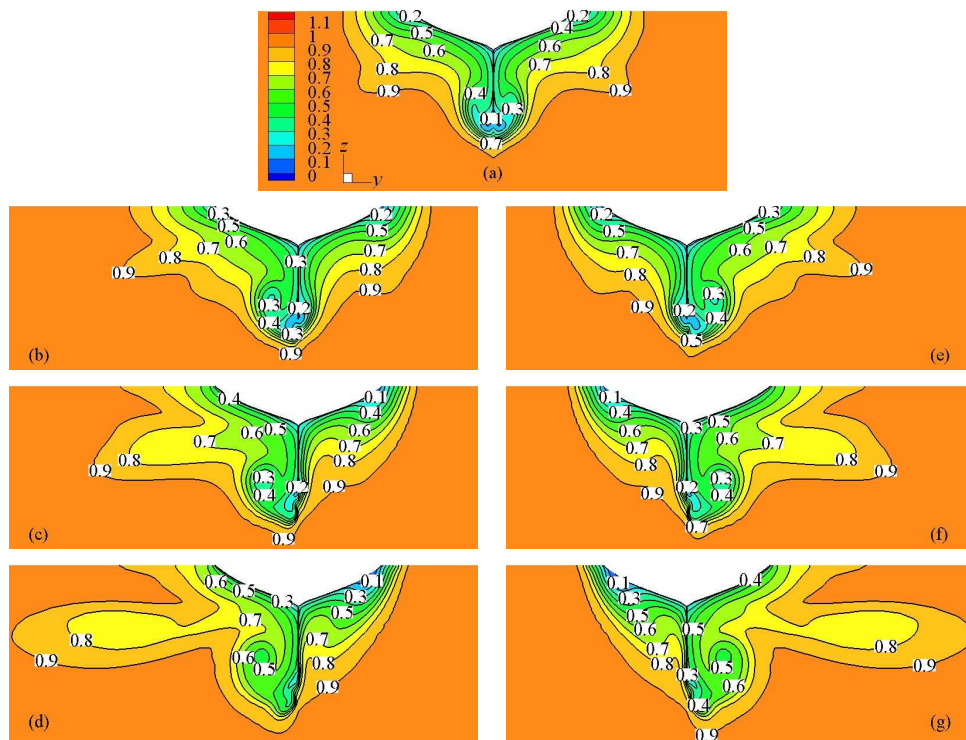


**Figura IV.6.** Validarea calitativă a distribuției de presiuni pe corpul navei, pe baza rezultatelor experimentale NMRI (<http://www.nmri.go.jp/cfd/cfdws05/>), vedere, de la pupa spre prova, asupra extremității pupa (a), vedere asupra fundului navei (b), vedere asupra bordului babord (c)

Se poate, astfel, concluziona că rezultatele obținute susțin continuarea studiului.

#### IV.2.2. Studiul curgerii în jurul carenei nude

De maximă importanță, distribuția de viteze axiale din planul discului elicei este determinată și analizată, în circumstanțele de curgere prezentate, pentru toate cele șapte unghiuri de derivă definite (figura IV.7). Este evident faptul că, în condițiile de studiu definite de situarea navei pe drum drept, curgerea în jurul carenei nude se manifestă într-o manieră axial-simetrică, în raport cu planul diametral. Pot fi observate, în acest context, al unghiului de derivă egal cu zero, cele două vârtejuri contrarotative care se regăsesc în forma de “*potcoavă*” pe care liniile de contur o descriu în zona discului elicei. Pe baza figurii IV.8 (b) poate fi identificată originea acestor formațiuni vorticale.



**Figura IV.7.** Distribuția de viteze axiale din planul discului elicei, la  $0.9825L_{PP}$ , pentru  $\beta = 0^\circ$  (a),  $\beta = -3^\circ$  (b),  $\beta = -6^\circ$  (c),  $\beta = -9^\circ$  (d),  $\beta = 3^\circ$  (e),  $\beta = 6^\circ$  (f),  $\beta = 9^\circ$  (g) – vedere de la pupa spre prova (carena nudă)

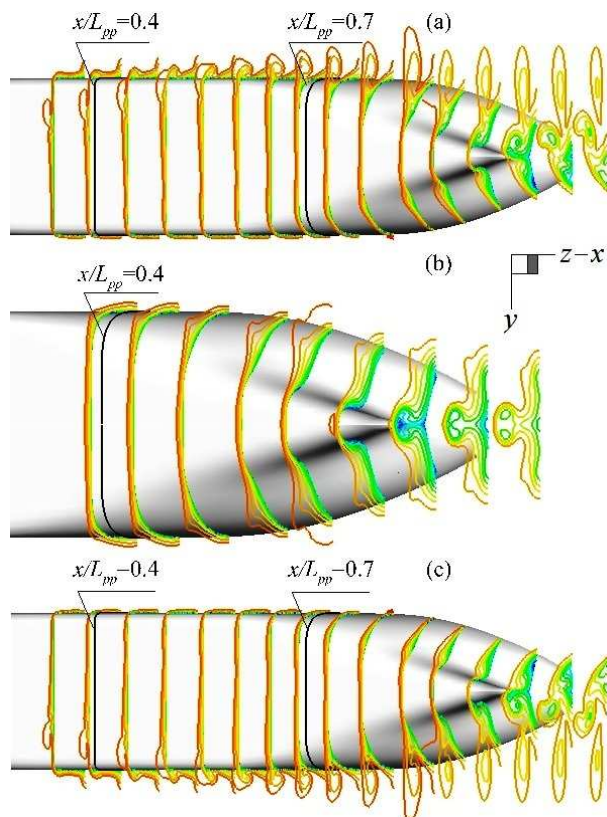
Cele două vârtejuri, proporțional dispuse în raport cu planul de simetrie longitudinală a carenei model, își fac apariția în zona de gurnă, în aval de  $0.7L_{PP}$ . Producerea acestora este favorizată de puternica îngustare pe care formele tancului *KVLCC2* o resimt în jurul acestei poziții, precum și de curburile pronunțate pe care prezența bulbului pupa le induce în această regiune.

Tot în figura IV.7 (a), respectiv în figura IV.8 (b) este surprinsă apariția și evoluția altor două formațiuni de tip vortical în zonele de margine babord, respectiv tribord ale conturilor de viteze. În mod similar primului set de vârtejuri prezentate, cele două zone de curgere turbionară se manifestă tot axial-simetric în raport cu planul diametral. Evoluția lor este, și în acest context, una contrarotativă. Având ca origine zona de gurnă, acestea își fac apariția, pentru cazul de curgere definit de neglijarea unghiului de atac al curentului de fluid, în jurul aceleiași valori de  $0.7L_{PP}$  pe direcție longitudinală. De fapt, precum Simonsen și Stern (2005 a) afirmă, cele două perechi de formațiuni vorticale au aceeași origine dar urmează căi diferite.

Așa cum figurile o evidențiază, prima grupă de vârtejuri se îndreaptă din zona gurnei către fundul navei urmând ca, după ce se întâlnesc în zona de funcționare a propulsorului, cele două vârtejuri contrarotative să se desfășoare, în mod simetric, în aval de navă. Intensitatea lor se diminuează odată cu îndepărtarea de aceasta. Cea de-a doua pereche vorticală se dezvoltă de-a lungul bordurilor.

Continuând în direcția investigării hidrodinamice a câmpului incident de curgere vâscoasă care se manifestă în jurul navei model *KVLCC2*, sunt considerate figurile IV.7 (b)–(g), respectiv figurile IV.8 (a) și (c). Astfel, figurile IV.7 (b)–(g) evidențiază, pentru carena nudă, manifestarea simetrică pe care curgerea incidentă o are, față de planul diametral, în cazurile de studiu date de unghiurile de atac egale dar de semn contrar. De asemenea, aceeași evoluție în oglindă în raport cu planul  $xOz$  este subliniată și de reprezentările pe care figurile IV.8 (a) și (c) le furnizează pentru cazurile de cercetare definite de  $\beta = \pm 9^\circ$ .

În același context, este înfățișat și modul în care prezența activă a curentului incident influențează curgerea, intensitatea formațiunilor vorticale care se dezvoltă în zonele de margine ale câmpului de viteze axiale fiind gradual crescută odată cu îndepărtarea de zero a unghiului de derivă.



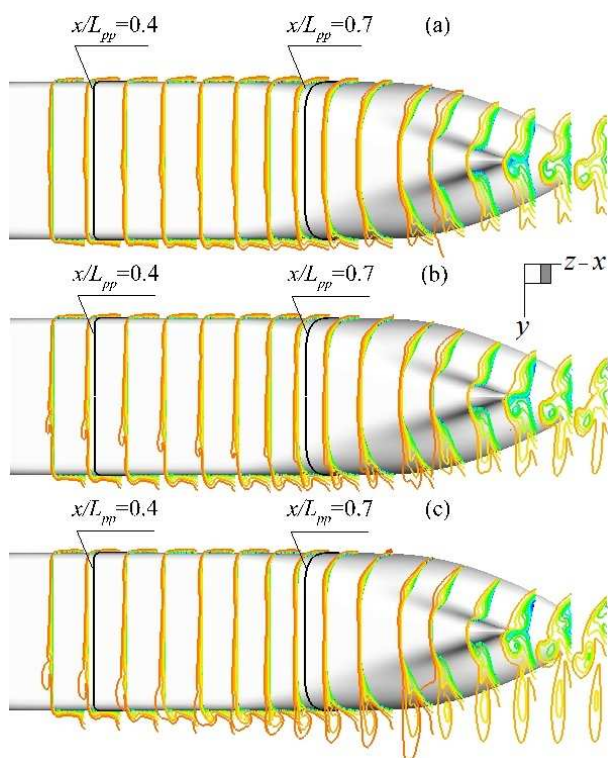
**Figura IV.8.** Evoluția, pe direcție longitudinală, a distribuției de viteze axiale, pentru  $\beta = -9^\circ$  (a),  $\beta = 0^\circ$  (b) și  $\beta = 9^\circ$  (c) – vedere asupra fundului navei (carenă nudă)

Este evident faptul că, influențate de acțiunea unui unghi de atac nenul, structurile turbionare axial-simetrice distribuite în cazul situării navei pe drum drept, își modifică magnitudinea și uniformitatea. Se remarcă, astfel, evoluția incidentă pe care curgerea o înregistrează, în timpul unei mișcări de derivă, fiind subliniat faptul că amplitudinea acestor formațiuni vorticale crește diagonal, pe direcția de incidență a curentului de fluid, o diminuare a acestora înregistrându-se în bordul de incidență.

În ceea ce privește cel de-al doilea vârtej, simetric desfășurat de-a lungul bordului babord în condițiile de studiu descrise de  $\beta = 0^\circ$ , sub influența activă a unghiului de atac  $\beta = 9^\circ$  acesta își păstrează poziția pe lungime a originii modificându-și, în mod considerabil, intensitatea. Analiza, în detaliu, a figurii IV.8 (c) subliniază fenomenul în sine, evident fiind faptul că, în planul discului elicei, acesta nu se mai regăsește deloc.

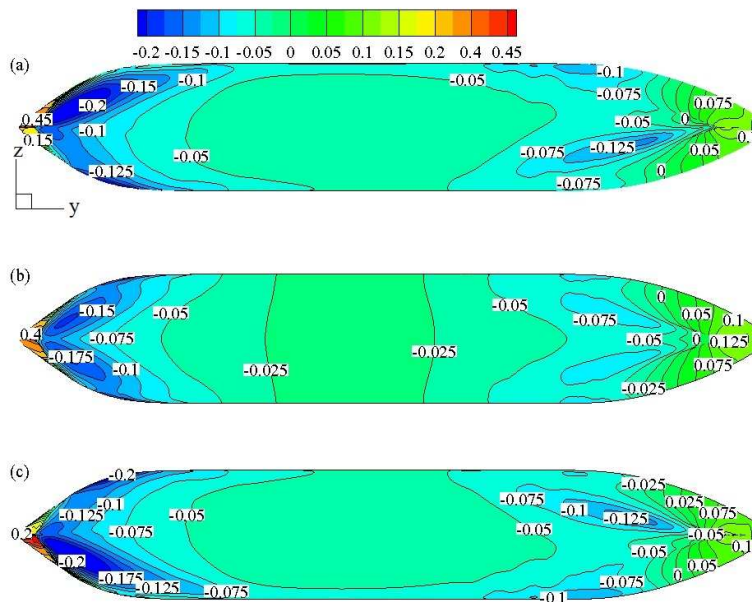
Cele două vârtejuri contrarotative originare tot la  $0.7L_{pp}$ , în zona de gurnă, vârtejuri care acționează pe direcție longitudinală redând așa numita formă de "potcoavă" din zona discului elicei, își modifică, în mod simțitor, atât manifestarea axial-simetrică, cât și intensitatea. Cazul de curgere descris de unghiul maxim de derivă considerat evidențiază desfășurarea de amplitudinea a vârtejurii din tribord, în zona de babord a extremității pupa, zonă aflată pe direcția de incidență a fluidului, acesta nepărând a se manifesta.

Interesant fiind a se depista poziția aproximativă a originii vârtejurilor de gurnă ce se desfășoară semnificativ de-a lungul bordului opus incidenței curentului, este generată figura IV.9. Este evident faptul că, odată cu îndepărtarea de zero a lui  $\beta$ , evoluția vârtejurilor laterale se modifică, originea acestora mutându-se, gradual, spre prova.



**Figura IV.9.** Evoluția, pe direcție longitudinală, a distribuției de viteze axiale, pentru  $\beta = 3^\circ$  (a),  $\beta = 6^\circ$  (b), respectiv  $\beta = 9^\circ$  (c) –vedere asupra fundului navei (carenă nudă)

Investigarea hidrodinamică a distribuției de presiuni pe corpul navei este necesară pentru a completa studiul curgerii în jurul carenei nude. În acest sens, este considerată figura IV.10.



**Figura IV.10.** Distribuția de presiuni pe corpul navei pentru  $\beta = -9^\circ$  (a),  $\beta = 0^\circ$  (b), respectiv  $\beta = 9^\circ$  (c) –vedere asupra fundului navei (carenă nudă)

Soluțiile prezentate în raport cu coeficientul de presiune, pentru cazurile de curgere descrise de  $-9^\circ$ ,  $0^\circ$ , respectiv  $9^\circ$  derivă, evidențiază, pentru nava pe drum drept, cât și pentru unghiurile de atac egale dar de semn contrar, evoluția simetrică în raport cu planul diametral a acestuia.

Se poate, astfel, observa faptul că zona extremității prova corespunde celor mai ridicate valori ale  $c_p$ . Uniform distribuite de o parte și de alta a planului de simetrie  $xOz$ , în cazul unghiului de derivă nul, și puternic accentuate pe direcția de incidență a curentului de fluid, în cazurile de studiu descrise de  $\pm 9^\circ$  unghi de derivă, zonele cu presiune maximă corespund de fapt zonelor în care fluidul atingând corpul navei stagnează.

Se poate, astfel, afirma că, strict legată de evoluția vitezelor axiale, distribuția de presiuni pe corpul navei vine să sublinieze caracterul vortical al curgerii care se dezvoltă în jurul unei carene din clasa celor de tip VLCC, fiind identificate o serie de fenomene turbulente reliefate atât de valorile presiunii, cât și de magnitudinea vitezelor axiale.

Este, de asemenea, introdusă validarea tehnicilor de tip CFD utilizate în sensul determinării rezistenței la înaintare, al forței hidrodinamice laterale pe corpul navei și al momentului hidrodinamic de rotație în plan orizontal.

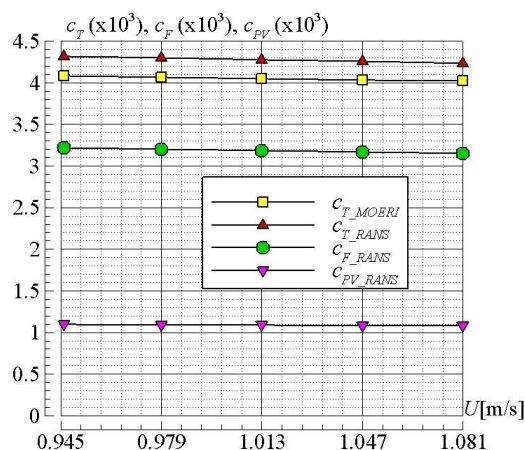
### IV.3. Rezistența la înaintare a carenei nude

Mărime definitorie în raport cu performanțele hidrodinamice ale carenei, “rezistența totală la înaintare a navei,  $R_T$ , reprezintă proiecția rezultantei forțelor hidro-aerodinamice care acționează asupra navei, pe direcția vitezei de deplasare și se opun mișcării de avans” (Obreja, 2005).

În cadrul prezentei lucrări de studiu doctoral, este considerată direcția utilizării și implementărilor tehnicilor de tip CFD în procesul de determinare a performanțelor de rezistență la înaintare ale unei carene date, fiind prezentată validarea metodologiei de calcul al forței de rezistență la înaintare a carenei nude.

#### IV.3.1. Validarea metodologiei de calcul al rezistenței la înaintare

Plecând de la condițiile de modelare prezentate în cadrul paragrafului IV.1 al prezentului capitol, este considerată validarea metodologiei de calcul al rezistenței la înaintare a carenei nude, un număr de patru viteze fiind, suplimentar, abordate față de 1.047 m/s—viteză de regim.



**Figura IV.11.** Variația, în raport cu viteza, a coeficientului rezistenței totale la înaintare a carenei model KVLCC2 (numeric, experiment) și a coeficienților componentelor de frecare, respectiv de formă ale acesteia (numeric) (carenă nudă)

Figura IV.11 prezintă evoluția, în raport cu viteza modelului KVLCC2, a coeficientul rezistenței la înaintare a carenei model, fiind reprezentate atât soluțiile determinate experimental, cât și soluțiile CFD.

Tabelul IV.1 redă, în procente, magnitudinea eroarii de comparație EFD–CFD.

**Tabelul IV.1.** Eroarea de comparație *EFD–CFD* determinată pentru coeficientul rezistenței totale la înaintare a carenei nude

$U$ [m/s]	$Rn$	$Fn$	$E\%c_{T\_MOERI}$
0.946	$4.155 \times 10^6$	0.129	-5.932%
0.979	$4.303 \times 10^6$	0.133	-5.790%
1.013	$4.452 \times 10^6$	0.138	-5.669%
1.047	$4.600 \times 10^6$	0.142	-5.545%
1.081	$4.749 \times 10^6$	0.147	-5.350%

### IV.3.2. Rezistența la înaintare a carenei nude în curent incident

Având drept obiectiv studiul curgerii în jurul carenei nude, prezentul capitol consideră, suplimentar situării navei pe drum drept, o serie de condiții de curgere definite de declarare a unui unghi de derivă variat, cu pas de  $3^\circ$ , între  $-9^\circ$  și  $9^\circ$ . În acest context, adițional studiului hidrodinamic al curgerii turbulente care se dezvoltă în jurul carenei model *KVLCC2* în prezența unui unghi de atac nenu, este prezentată evoluția coeficientului rezistenței la înaintare a carenei nude, cât și a coeficienților componentelor de frecare, respectiv de formă ale acesteia.

## IV.4. Forțele hidrodinamice laterale și momentele hidrodinamice pe corpul navei

În cadrul prezentei cercetări, tehnicile de tip *RANS* sunt utilizate pentru a determina, în condițiile de curgere redate, pentru cazul carenei nude, de unghiul de derivă variat, cu pas de  $3^\circ$ , între  $-9^\circ$  și  $9^\circ$ , forța hidrodinamică laterală și momentul hidrodinamic de rotație în plan orizontal, fiind considerată validarea metodologiei numerice utilizate.

### IV.4.1. Validarea metodologiei de calcul al forțelor și momentelor hidrodinamice pe corpul navei

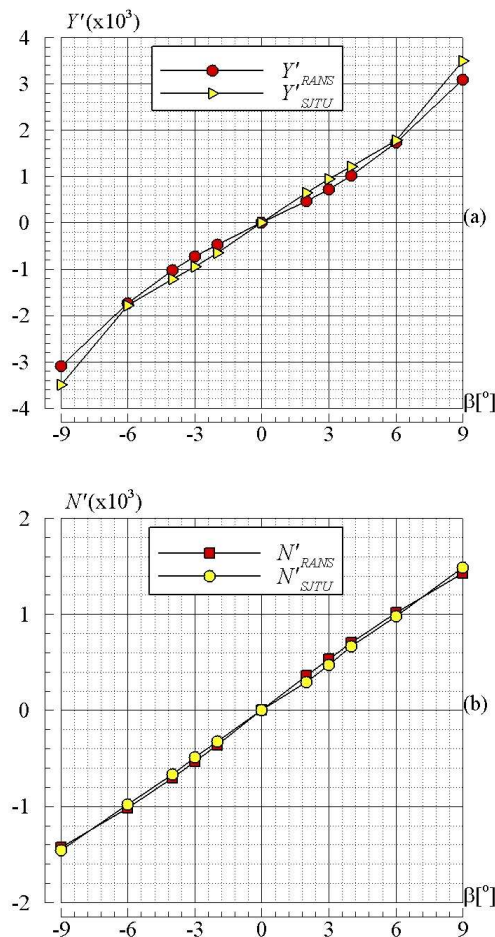
Rezultatele experimentale furnizate de Wang *et al.* (2008) sunt folosite pentru a calcula, în conformitate cu metodologia de validare *ITTC*, eroarea de comparație,  $E$ , atât pentru cazul forței adimensionale laterale,  $Y'$ , cât și pentru cazul momentului adimensional de rotație în plan orizontal,  $N'$ . Tabelul IV.3 este utilizat cu scopul de a evidenția, pentru fiecare  $\beta$  dat, mărimea erorii de comparație.

**Tabelul IV.3.** Eroarea de comparație *EFD–CFD* pentru forța adimensională laterală, respectiv pentru momentul adimensional de rotație în plan orizontal

$\beta [^\circ]$	$E\% Y'_{SJTU}$	$E\% N'_{SJTU}$
-9	11.78%*	2.373%*
-6	2.740%	-3.439%
-4	16.286%*	-5.347%*
-3	23.120%*	-9.562%*
-2	28.406%*	-11.157%*
0	-	-
2	28.395%*	-23.018%*
3	23.120%*	-12.171%*
4	16.290%*	-5.344%*
6	2.741%	-3.435%
9	11.781%*	4.169%*

\*valori obținute prin interpolare

Trebuie menționat că, deși suficient de mari, erorile de comparație înregistrate sunt în deplină concordanță cu rezultatele *SIMMAN 2008*, o valoare medie de 11%  $D$ , calculată pentru toate rezultatele simulărilor numerice furnizate la workshopul de la Copenhaga în corespondența  $\beta = 10^\circ$ , fiind prezentată de Stern *et al.* (2011) atât pentru forța adimensională laterală, cât și pentru momentul adimensional de rotație în plan orizontal.



**Figura IV.12.** Evoluția, în raport cu unghiul de derivă, a  $Y'$  (numeric, experiment) (a), respectiv  $N'$  (numeric, experiment) (b) (carenă nudă)

Pentru a veni în sprijinul rezultatelor numerice, figura IV.12 evidențiază evoluția pe care forța adimensională laterală, respectiv momentul adimensional de rotație în plan orizontal o are în raport cu valoarea considerată a unghiului de derivă, atât pentru cazul soluției determinate numeric, precum și pentru cazul rezultatelor experimentale.

#### IV.5. Concluzii asupra studiului curgerii în jurul carenei nude

Temă de cercetare abordată în cadrul prezentului capitol, studiul curgerii în jurul carenei nude redă soluția analizei numerice a curgerii incidente care se dezvoltă în jurul unei nave model gen VLCC, în timpul unei manevre de tip PMM. O atenție deosebită este acordată validării metodologiei de calcul utilizate în direcția determinării distribuției de viteze și presiuni din jurul modelului experimental, precum și în direcția determinării rezistenței la înaintare a carenei nude și a forțelor și momentelor hidrodinamice pe corpul navei. Având la bază calculele numerice, realizate cu ajutorul solverului de tip RANS-SHIPFLOW, prezentul studiu oferă o măsură a caracteristicilor de curgere care se dezvoltă în pupa navei, în spațiul tridimensional de funcționare a sistemului elice-cârmă. Este evidențiat modul în care, prin prezența sa activă, unghiului de atac al curentului de fluid își pune

amprenta asupra curgerii vâscoase, cât și asupra performanțelor de rezistență la înaintare ale carenei în studiu.

Astfel, considerând rezultatele experimentale raportate la *Gothenburg 2000* de *POSTECH*, precum și rezultatele furnizate de Kim *et al.* (2001), validarea metodologiei de calcul al vitezelor axiale care se dezvoltă în lungul unei carene model reprezentative pentru clasa navelor tanc cu coeficient bloc mare și viteză mică a fost făcută, fiind evidențiată corectitudinea calculului numeric.

De asemenea, soluția determinată în raport cu validarea distribuției de viteze axiale din planul discului elicei (Marcu și Lungu, 2011) a fost prezentată și detaliată. Continuând în aceeași direcție a validării, prin analiză comparativă numeric–experiment, a metodologiei de calcul utilizate în determinarea caracteristicilor de curgere, rezultatele *NMRI* prezentate în cadrul workshopului de la Tokyo din 2005 pentru modelul experimental modificat *KVLCC2M* sunt considerate în raport cu distribuția de presiuni pe corpul navei.

Odată validată metodologia de tip *RANS* utilizată în raport cu determinarea câmpului de viteze și presiuni din jurul corpului navei, o analiză detaliată a curgerii incidente care se desfășoară în jurul modelului experimental *KVLCC2* este făcută. Prezenta cercetare contribuie, prin rezultatele analizate, la identificarea și interpretarea fenomenelor intens turbulente care iau naștere și se dezvoltă în jurul unei nave tanc de mari dimensiuni atât la navigația pe drum drept, precum și în timpul unei manevre.

De maxim interes, rezistența la înaintare a carenei nude este determinată pe baza calculului numeric pentru toate cele șapte unghiuri de derivă date, o abordare inovativă a acesteia fiind, în această manieră, prezentată. Este făcută validarea tehnicilor de tip *RANS* utilizate în această direcție, rezultatele furnizate de *MOERI* la *SIMMAN 2008* fiind folosite pentru a atinge acest obiectiv. Corectitudinea soluției numerice, dovedită pe baza analizei comparative *CFD–EFD*, permite viitoarea implementare a acestei metodologii în direcția creării unei alternative a testelor de rezistență la înaintare pentru carenele *VLCC*.

Prim pas făcut în sensul determinării performanțelor de manevrabilitate ale carenei *KVLCC2*, forțele și momentele hidrodinamice adimensionale pe corpul navei sunt calculate și reprezentate, fiind realizată, pe baza rezultatelor lui Wang *et al.* (2008), validarea tehnicilor numerice aplicate în acest scop. Deși semnificative, în cazul unghiurilor de derivă date de  $\beta = \pm 2^\circ$ , respectiv  $\beta = \pm 3^\circ$ , erorile de comparație sunt justificate pe baza rezultatelor prezentate de Stern *et al.* (2011) și Eca *et al.* (2005). Lipsa de maturitate a solverelor de tip *RANS*, în ceea ce privește acest tip de analiză argumentează, de asemenea, magnitudinea  $E$ . Aceasta este direcția, în care, prezenta lucrare contribuie prin informația adusă în raport cu simularea și investigarea testelor cu *PMM* static de tip “derivă statică” în sensul implementării acestui gen de metodologii în simularea manevrabilității navei.

Acționând în direcția studiului numeric al curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice, Capitolul V introduce analiza hidrodinamică a câmpului de curgere care se dezvoltă în jurul configurației corp–elice, influența propulsorului fiind explicit determinată și investigată. De asemenea, acțiunea pe care acesta o exercită asupra performanțelor de rezistență la înaintare, precum și asupra forțelor și momentelor pe corpul navei este analizată și explicată. Suplimentar, acest capitol consideră determinarea caracteristicilor de propulsie ale navei în studiu, conturându-se, în această manieră, o alternativă numerică a testelor experimentale de autopropulsie.



## Capitolul V

# Studiul curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice

Etapă de cercetare parcursă în direcția investigării numerice a curgerii care se dezvoltă în jurul configurației corp–elice–cârmă, studiul curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice consideră, suplimentar punctelor de analiză parcurse în Capitolul IV, determinarea caracteristicilor de propulsie ale navei în studiu. Este conturată, în această manieră, o alternativă numerică a testelor experimentale de autopropulsie.

Condiționat de cunoașterea parametrilor geometrici ai elicei navale, modelul liniei portante impune declararea corectă a geometriei propulsorului.

### V.1. Elicea navală

Elice de tip propulsiv, elicea navală transformă energia motorului în lucru mecanic de înaintare a navei asigurând acea forță de împingere care va determina mișcarea de avans a acesteia.

Raportată fiind la un sistem local de coordonate carteziene, geometria elicei navale este complet definită dacă se cunosc următorii parametri:

- caracteristicile geometrice ale elicei;
- geometria profilelor elicei;
- rapoartele de disc;
- forma palei.

### V.2. Condiții de modelare

Similar cazului de investigare numerică a carenei nude, studiul curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice este realizat în condițiile de curgere, concordant definite în raport cu metodologia experimentală considerată în cadrul testelor cu *PMM* static realizate în bazinul de la *MOERI*.

Suplimentar acestora, validarea metodologiei de calcul al elicei este făcută, în deplin acord, cu datele de modelare îndeplinite în cazul testelor de elice în apă liberă desfășurate tot de *MOERI*. Soluțiile experimentale prezentate, în raport cu performanțele de propulsie ale carenei *KVLCC2*, de Kim *et al.* (2001) sunt utilizate în sensul validării calculului de propulsie.

Astfel, curgerea în jurul corpului navei echipate cu elice este soluționată, fiind conturate următoarele direcții de cercetare:

- validarea metodologiei de calcul al elicei;
- investigarea hidrodinamică a curgerii care se dezvoltă în jurul navei echipate cu elice, atât la navigația pe drum drept cât și în timpul unei situații de manevră de tip “*derivă statică*” și determinarea influenței propulsorului în raport cu studiul curgerii în jurul carenei nude;
- determinarea performanțelor de rezistență la înaintare înregistrate pentru configurația dată și analiza efectului propulsorului în raport cu studiul curgerii în jurul carenei nude;
- validarea tehnicilor de tip *CFD* utilizate în sensul determinării coeficienților de propulsie ai carenei în studiu;
- determinare forței laterale adimensionale și a momentului de rotație în plan orizontal pentru cazul navei echipate cu elice, în condițiile de curgere incidentă considerate, și

determinarea efectelor, pe care, prezența activă a elicei le induce în raport cu studiul curgerii în jurul carenei nude.

### V.3. Studiul hidrodinamic al curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice

Considerând condițiile de modelare definite pentru cazul navei echipate cu elice, este realizat studiul hidrodinamic al curgerii în jurul configurației prezentate. Este efectuată, pe baza analizei comparative *CFD–EFD*, o validare prealabilă a metodologiei de calcul al elicei.

#### V.3.1. Validarea metodologiei de calcul al elicei

Având la bază modelul teoretic al liniei portante, metodologia de calcul al elicei este validată pe baza unei analize prin comparație a soluțiilor determinate numeric și experimental.

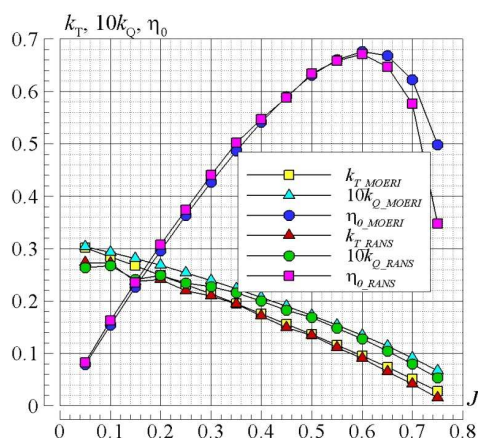


Figura V.1. Diagrama de elice în apă liberă. Comparație numeric–experiment

Figura V.1 evidențiază buna concordanță care există între cele două seturi de soluții, în intervalul de studiu descris de 0.2 până la 0.65  $J$ .

**Tabelul V.1.** Eroarea de comparație *EFD–CFD* pentru coeficientul împingerii– $k_T$ , coeficientul momentului– $k_Q$  și randamentul elicei în apă liberă– $\eta_0$

$J$	$E\%k_{T\_MOERI}$	$E\%k_{Q\_MOERI}$	$E\%\eta_{0\_MOERI}$
0.05	9.441%	13.102%	–4.219%
0.1	4.087%	8.927%	–5.331%
0.15	11.069%	14.326%	–3.809%
0.2	3.435%	7.165%	–4.010%
0.25	4.992%	7.741%	–2.976%
0.3	1.747%	5.005%	–3.425%
0.35	0.321%	3.398%	–3.175%
0.4	2.282%	3.378%	–1.142%
0.45	4.447%	4.079%	0.384%
0.5	1.529%	2.046%	–0.522%
0.55	4.075%	3.715%	0.377%
0.6	5.358%	4.774%	0.613%
0.65	11.756%	8.895%	3.147%
0.7	19.048%	12.549%	7.434%
0.75	44.878%	21.014%	30.213%

Suficient de bună așa cum valorile calculate ale erorilor de comparație, prezentate în tabelul V.1, o demonstrează, metoda se dovedește a fi ineficientă în condițiile de operare descrise de vitezele de avans situate la limita inferioară, respectiv superioară a intervalului de referință al  $J$ .

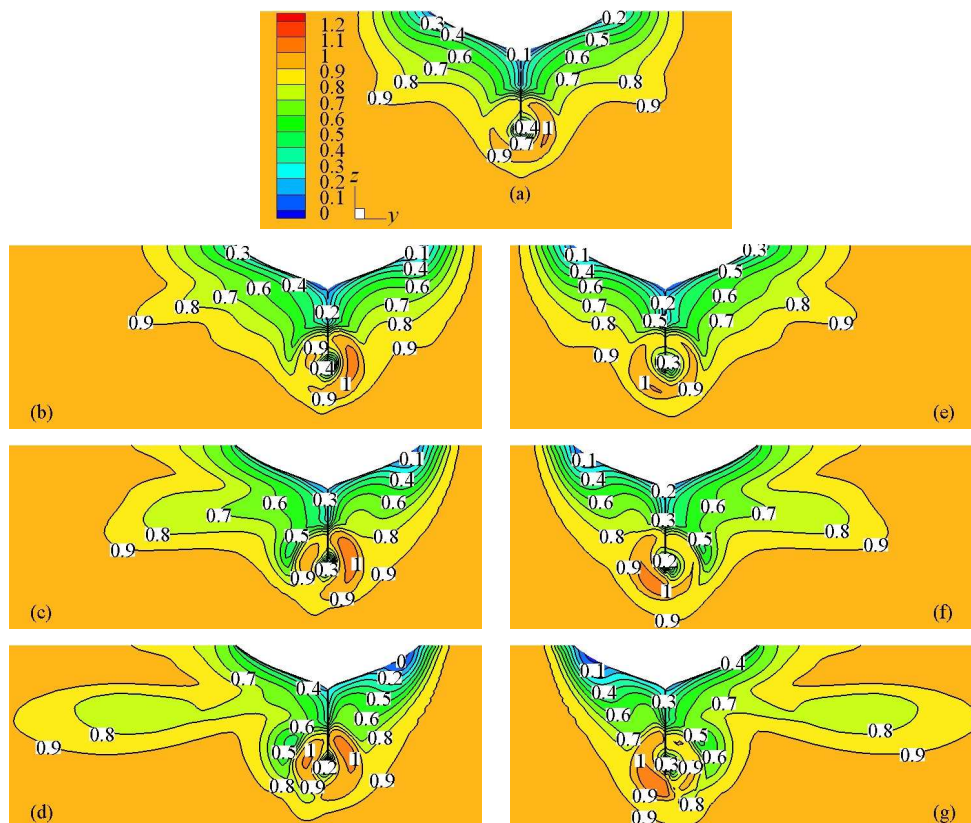
Dat fiind faptul că, în toate situațiile de curgere considerate, valoarea calculată a avansului relativ se situează în intervalul de studiu definit de cele mai mici erori metoda de calcul al elicei este considerată a fi validă, fiind, în continuare, abordat studiul hidrodinamic al curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice.

### V.3.2. Studiul curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice

Știind că, din punct de vedere al spațiului de operare, elicea funcționează în pupa navei, în zona “dărei hidrodinamice a corpului navei” (Obreja, 2005), porțiune în care neuniformitatea curentului este accentuată fluidul fiind considerabil perturbat de corp, determinarea și investigarea distribuției de sîaj din planul discului elicei devine o necesitate. De asemenea, elicea accelerează fluidul din amonte determinând o scădere a valorii presiunilor din jurul extremității pupa și, în mod implicit, o creștere a rezistenței la înaintare a navei față de cazul carenei nude. Această “aspirație a curentului de fluid de către elice” (Obreja, 2005) se numește sucțiune.

Considerând aceste fenomene care iau naștere și evoluează în pupa navei, în arealul de funcționare a elicei, este absolut justificată investigarea hidrodinamică a curgerii vâscoase care definește spațiul de operare a propulsorului, fiind de maxim interes modul în care acesta acționează în direcția modificării distribuției de viteze și presiuni din jurul corpului navei.

Considerând același parcurs ca și în cadrul Capitolului IV, este prezentată și explicată distribuția de viteze axiale din planul discului elicei. Figura V.7 este utilizată în direcția examinării soluțiilor de curgere obținute pentru toate cele șapte cazuri de “derivă statică” modelate conform paragrafului V.2.



**Figura V.2.** Distribuția de viteze axiale din planul discului elicei, la  $0.9825L_{pp}$ , pentru  $\beta=0^\circ$  (a),  $\beta=-3^\circ$  (b),  $\beta=-6^\circ$  (c),  $\beta=-9^\circ$  (d),  $\beta=3^\circ$  (e),  $\beta=6^\circ$  (f),  $\beta=9^\circ$  (g)–vedere de la pupa spre prova (nava echipată cu elice)

Se poate, astfel, remarca faptul că prin comparație cu situația de studiu al curgerii în jurul carenei nude desfășurate într-un mod axial-simetric în raport cu planul diametral, atât pentru cazul de navigație pe drum drept, cât și pentru cazurile de incidență date de unghiurile de atac egale dar de semn contrar, echiparea navei cu o elice activă determină înlăturarea simetriei curgerii. Este absolut evident efectul rotațional al propulsorului.

Astfel, dacă pentru situația de curgere descrisă de  $\beta = 0^\circ$ , în cazul carenei nude, două vârtejuri contrarotative își făceau simțită prezența în zona discului elicei, funcționarea propulsorului acționează în direcția eliminării acestora. Se remarcă, totuși, în interiorul aceleiași arii a discului elicei, în zona butucului acesteia, o formațiune vorticală de slabă intensitate care, în mod evident, are la origine cele două formațiuni turbulente, pe larg, descrise în Capitolul IV. Evidențiată și în figura V.3 (b) aceasta se formează, asemănător curgerii în jurul carenei nude, în aval de  $0.7L_{pp}$ , elicea de sens dreapta direcționând-o, incident, în sensul bordului babord.

Mai mică sau egală cu jumătate din viteza navei, în condițiile de studiu descrise de nava fără propulsor, viteza curentului de fluid este considerabil mărită la trecerea prin discul elicei. Magnitudinea acesteia atinge valori egale sau chiar mai mari decât valoarea  $U$ .

În ceea ce privește liniile de contur care exprimă distribuția de viteze axiale din planul de funcționare a propulsorului, figurile V.2 (a)–(g) relevă faptul că în exteriorul ariei discului acesteia nu își modifică foarte mult așezarea și nici magnitudinea, așa cum și Simonsen și Stern (2005 b) o evidențiază pentru nava tanc Esso Osaka. Acestea sunt condițiile, în care, similar curgerii în jurul carenei nude, este remarcată apariția și evoluția unei perechi de vârtejuri contrarotative, în zonele de margine ale conturilor de viteze, așezarea lor părând a fi axial-simetrică în raport cu planul diametral, atât pentru  $\beta = 0^\circ$ , cât și pentru unghiurile de derivă egale dar de semn contrar.

În mod asemănător formațiunilor vorticale de același gen, descrise în Capitolul IV, cele două vârtejuri contrarotative își găsesc originea tot în zona de gurnă, respectiv în aval de  $0.7L_{pp}$ , pentru zero grade unghi de incidență a curentului de fluid.

Se remarcă, astfel, două seturi de vârtejuri care, așa cum figurile V.2 (a), respectiv V.3 (b) o evidențiază, în cazul situării navei pe drum drept, prezintă aceeași origine dar evoluții diferite. Astfel, vârtejurile înregistrate în planul de funcționare a propulsorului se îndreaptă din zona de gurnă spre fundul navei urmând ca, odată trecute prin discul elicei, să se dezvolte în aval de acesta pe direcția bordului babord, în timp ce perechea de vârtejuri contrarotative distinse în zonele de margine ale distribuției de viteze axiale se desfășoară în lungul bordurilor spre suprafața liberă a apei. Tot figura V.2 reliefează efectul de sucțiune al organului de propulsie liniile de contur fiind “*aspirate*” spre discul elicei în partea superioară a acestuia.

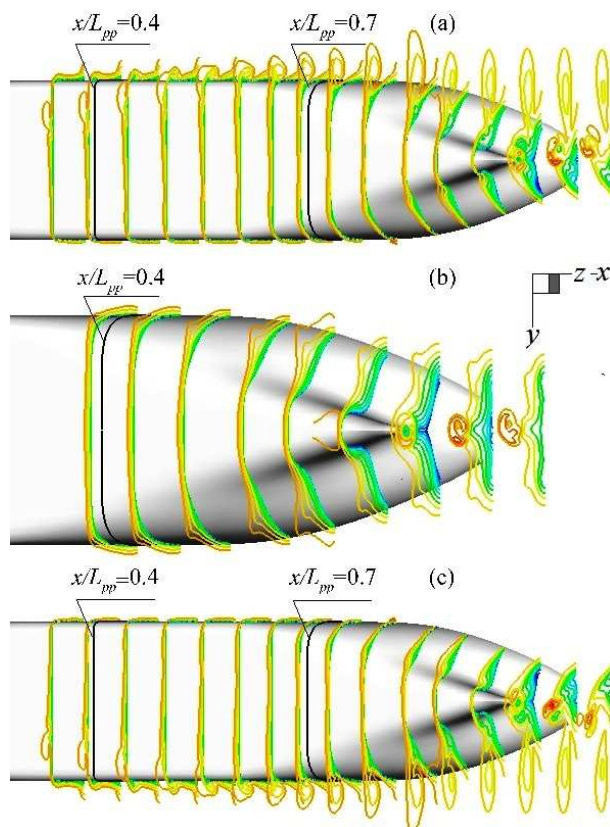
Urmând aceeași direcție, a studiului hidrodinamic al curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice, cercetarea redă modul în care prezența elicei influențează distribuția de viteze axiale din planul de funcționare a acesteia, fiind considerate, în acest sens, figurile V.2 (b)–(g), respectiv figurile V.3 (a) și (c). Astfel, este identificată, încă o dată, asimetria pe care funcționarea propulsorului o induce, prin comparație cu situația de studiu definită de cazul carenei nude.

Înregistrând o desfășurare similară celei descrise în cadrul Capitolului IV, curgerea incidentă amprentează, în mod evident, distribuția de viteze axiale din planul discului elicei, magnitudinea formațiunilor turbulente care se dezvoltă la marginile conturilor de viteze crescând direct proporțional cu creșterea gradului de incidență a curentului de fluid. În bordul opus bordului de atac, este semnalată o atenuare a acestei evoluții vorticale, așa cum figurile în studiu o conturează, în bordul de incidență.

Analiza cazurilor de curgere definite de  $3^\circ$ ,  $6^\circ$ , respectiv  $9^\circ$  unghi de atac relevă, pe baza figurilor V.2 (e)–(g), faptul că, în condițiile de curgere definite de prezența unui unghi de atac pozitiv, elicea acționează în sensul diminuării și chiar înlăturării vârtejurii de gurnă care, în cazul carenei nude, își face în mod semnificativ simțită prezența în zona de tribord a discului elicei, evident fiind faptul că fluidul este puternic accelerat de către aceasta.

De asemenea, așa cum aceleași figuri o reliefează, în cazurile de studiu date de prezența unui unghi de derivă mai mare ca zero, elicea de sens dreapta accelerează curentul de fluid în bordul de

incidență a acestuia, bord în care, în cazul carenei nude, viteza axială înregistrează cele mai mari valori. Este, în același context, evident faptul că, odată cu creșterea unghiului de derivă, zona de viteze axiale mari se reduce deplasându-se spre bordul babord. În condițiile de cercetare descrise de  $-3^\circ$ ,  $-6^\circ$ , respectiv  $-9^\circ$  derivă, figurile V.2 (b)–(d) evidențiază, de asemenea, efectul rotațional și accelerator al elicei, cele mai mari valori ale vitezei axiale fiind înregistrate în zona de tribord, în bordul opus incidenței curentului.



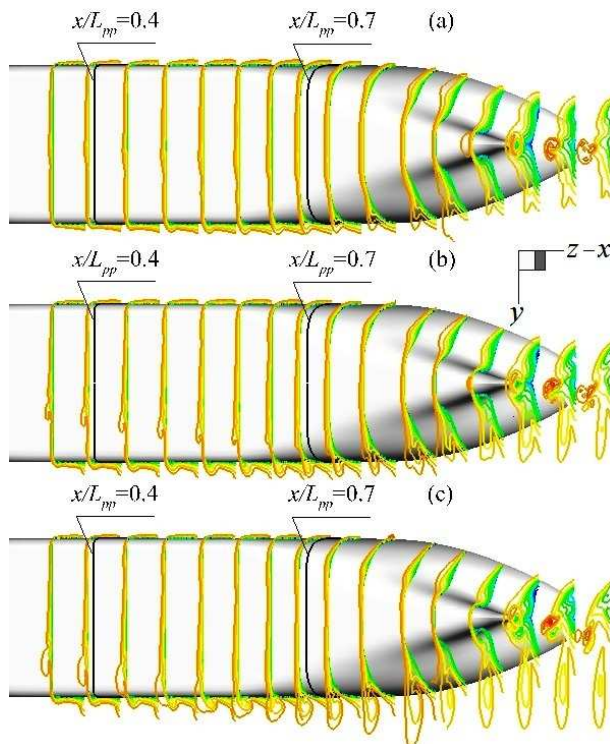
**Figura V.3.** Evoluția, pe direcție longitudinală, a distribuției de viteze axiale, pentru  $\beta = -9^\circ$  (a),  $\beta = 0^\circ$  (b) și  $\beta = 9^\circ$  (c)–vedere asupra fundului navei (navă echipată cu elice)

Este interesant faptul că, analiza comparativă a distribuției de viteze axiale din planul discului elicei, făcută în corespondența unghiurilor de atac egale dar de semn contrar, evidențiază, pentru cazurile de derivă negativă, viteze axiale mai mari în bordul opus incidenței curentului. Se poate, astfel, concluziona că elicea de sens dreapta este dezavantajată de condițiile de curgere date de considerarea unui unghi de atac pozitiv, efectul accelerator al acesteia manifestându-se mai bine în cazul în care sensul de rotație corespunde bordului în care curentul este incident.

Considerând aceeași direcție, a introspecției curgerii cu unghi de atac care se dezvoltă în jurul configurației corp–elice, figurile V.3 (a) și (c) sunt utilizate pentru a evidenția, ca și în cazul carenei nude, evoluția intens vorticală pe care fluidul o manifestă în lungul corpului navei, în condițiile de curgere date de  $\pm 9^\circ$  derivă. Este conturat faptul că, prin comparație cu situarea navei pe drum drept, formațiunile vorticale care se dezvoltă în lungul bordului opus direcției de atac a curentului își fac simțită prezența la  $0.4L_{pp}$ , cel de-al doilea vârtej, aproximativ simetric extins pe direcția bordului incident în cazul de curgere definit de  $\beta = 0^\circ$ , păstrându-și originea dar nu și intensitatea.

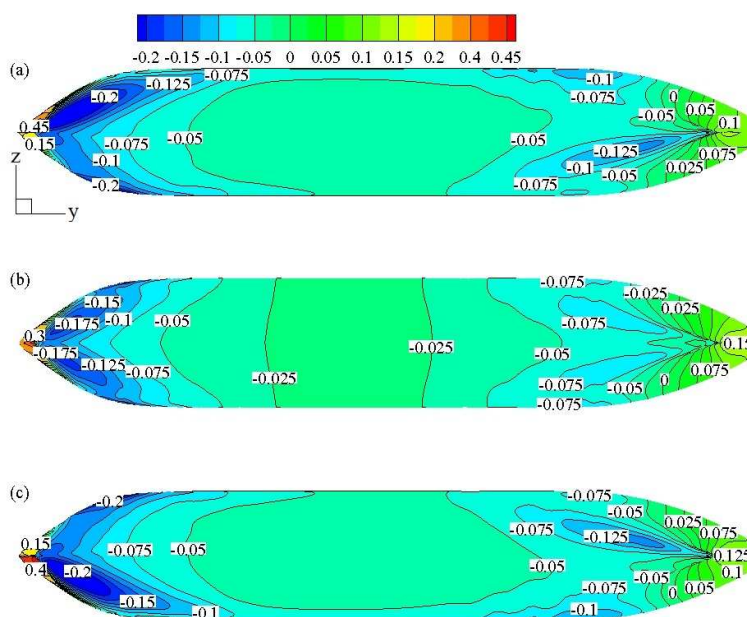
De interes fiind a se determina poziția pe care originea vârtejurilor de gurnă dezvoltate, în mod semnificativ, de-a lungul bordului opus incidenței curentului o ocupă în lungul axei  $Ox$ , precum și modul în care aceasta este influențată de modificarea  $\beta$ , o serie de rezultate prezentate în

corespondența figurii IV.9 sunt furnizate pentru cazul navei echipate cu elice (figura V.4). Ca și în cazul carenei nude, este reliefat faptul că intensitatea acestor formațiuni de tip vortical variază direct proporțional cu valoarea absolută a unghiului de derivă originea lor mutându-se gradual spre prova.



**Figura V.4.** Evoluția, pe direcție longitudinală, a distribuției de viteze axiale, pentru  $\beta = 3^\circ$  (a),  $\beta = 6^\circ$  (b), respectiv  $\beta = 9^\circ$  (c) – vedere asupra fundului navei (navă echipată cu elice)

Este abordată, în continuare, determinarea și investigarea distribuției de presiuni pe corpul navei, fiind furnizată, în acest sens, figura V.5.



**Figura V.5.** Distribuția de presiuni pe corpul navei pentru  $\beta = -9^\circ$  (a),  $\beta = 0^\circ$  (b), respectiv  $\beta = 9^\circ$

(c)–vedere asupra fundului navei (navă echipată cu elice)

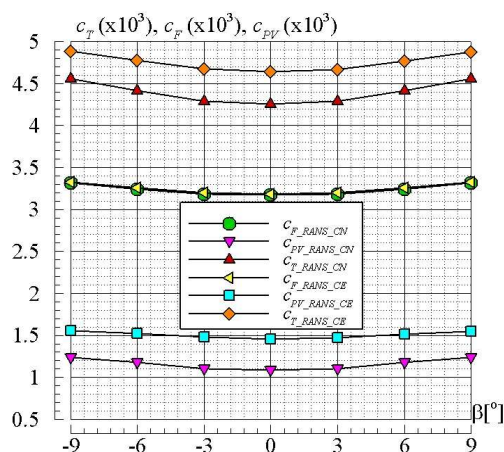
Este subliniat faptul că, în raport cu distribuția de presiuni pe corpul navei, efectul propulsorului este resimțit în zona extremității pupa, câmpul de curgere care se dezvoltă atât în partea prova, cât și mult în aval de planul diametral fiind nesemnificativ schimbat de prezența activă a acestuia. Prin comparație cu situația de studiu al carenei nude, o sensibilă diminuare a magnitudinii  $c_p$  este înregistrată în amonte de discul elicei.

Prefigurându-se drept necesară, este realizată analiza performanțelor de rezistență la înaintare și propulsie ale navei model *KVLCC2*.

#### V.4. Rezistența la înaintare a navei echipate cu elice în curent incident

Considerând pentru cazul navei echipate cu elice condițiile de curgere aflate în corespondența unui unghi de derivă variat, cu pas de  $3^\circ$ , între  $-9^\circ$  și  $9^\circ$ , este prezentată evoluția în raport cu unghiul de derivă a coeficientului rezistenței totale la înaintare a carenei model *KVLCC2*, precum și a coeficienților componentelor de frecare, respectiv de presiune vâscoasă ale acesteia. Figura V.6 este utilizată în direcția realizării unei analize comparative a soluțiilor numerice obținute pentru actuala configurație și pentru cazul de studiu al curgerii în jurul carenei nude.

Este evidențiat aportul, pe care, pentru fiecare unghi de atac al curentului de fluid, elicea, prin prezența sa activă, îl aduce în raport cu magnitudinea rezistenței la înaintare și a componentelor acesteia.



**Figura V.6.** Variația, în raport cu unghiul de derivă, a coeficientului rezistenței totale la înaintare a carenei model *KVLCC2* și a coeficienților componentelor de frecare, respectiv de formă ale acesteia, pentru cazul carenei nude (CN) și al navei echipate cu elice (CE)

Suplimentar soluțiilor numerice prezentate în cadrul Capitolului IV și complementar prezentei analize a influenței pe care elicea activă o exercită asupra performanțelor de rezistență la înaintare ale carenei model *KVLCC2*, sunt considerate, pentru cazul situării navei pe drum drept, determinarea și investigarea performanțelor de propulsie ale navei în studiu.

#### V.5. Validarea metodologiei de calcul al propulsiei

Deși, în majoritatea cercetărilor, separat abordate, rezistența și propulsia sunt concepte reciproc dependente: rezistența la înaintare condiționează calculul de propulsie impunând generarea de către elice a unei forțe de împingere care să învingă proiecția, dezvoltată pe direcția vitezei de deplasare a carenei, a “rezultantei forțelor hidro-aerodinamice care acționează asupra navei” (Obreja, 2005), în timp ce studiile de propulsie vizează determinarea împingerii propulsive, precum și analiza interacțiunii corp-propulsor.

Prezenta cercetare redă performanțele de propulsie pe care elicea le dezvoltă în pupa navei. Sunt investigate interacțiunea corp-propulsor și modul în care aceasta influențează caracteristicile hidrodinamice și/sau de propulsie ale navei tanc considerate.

Rezultatele obținute în raport cu rezistența la înaintare a carenei nude, cu soluțiile simulării numerice a testelor de propulsie și cu rezultatele testelor virtuale de elice în apă liberă au fost utilizate pentru a determina coeficientul de siaj,  $w$ , coeficientul de sucțiune,  $s$ , randamentul relativ de rotație,  $\eta_R$ , coeficientul de influență a corpului,  $\eta_H$ , și coeficientul cvasipropulsiv,  $\eta_D$ , fiind utilizată în acest sens metodologia ITTC (1978) coroborată cu tehnica identității împingerilor (Dumitrescu *et al.*, 1990).

### V.5.1. Coeficientul de siaj efectiv

Așadar, pentru nava model considerată, rezultatele obținute în cadrul testelor virtuale de elice în apă liberă și de autopropulsie, realizate în condițiile de modelare declarate în paragraful V.2, au fost utilizate pentru a determina, pe baza tehnicii identității împingerii (Dumitrescu *et al.*, 1990), magnitudinea  $w_e$ . Este dată, în direcția validării calculului computațional, soluția experimentală determinată de Kim *et al.* (2001).

Este calculat, astfel, un *coeficient de siaj efectiv la identitatea împingerii*. Egal cu 0.398 acesta este definit de o eroare de comparație CFD-EFD de 10.106%.

De maxim interes, transpunerea coeficientului de siaj de la model la natură este făcută în conformitate cu metodologia ITTC (1978), o eroare de comparație de -1.669% valoare efectivă fiind calculată în raport cu cele două soluții existente: 0.310-soluție computațională, respectiv 0.305-soluție de tip EFD.

### V.5.2. Coeficientul de sucțiune

Utilizând datele obținute ca rezultat al simulării numerice a testelor de rezistență și propulsie, realizate pentru nava model KVLCC2 în condițiile de modelare definite în cadrul paragrafului V.2, a fost determinat *coeficientul de sucțiune* corespunzător situației navei pe drum drept.

Asemănător celor două seturi de rezultate prezentate în corespondența coeficientului de siaj, la model și la natură, magnitudinea erorii de comparație este determinată pe baza soluției de tip EFD furnizate de Kim *et al.* (2001), -3.514% fiind valoarea înregistrată a acesteia pentru cazul coeficientului de sucțiune redat de 0.197 soluție computațională, respectiv 0.19 soluție experimentală.

### V.5.3. Randamentul relativ de rotație

Fiind dat de 1.127 valoare computațională și 1.005 valoare EFD, randamentul relativ de rotație prezintă cea mai mare eroare de comparație numeric-experiment dată de -12.144%.

### V.5.4. Coeficientul de influență a corpului

Dat fiind că,  $\eta_H$ -coeficientul de influență a corpului se dovedește a fi dependent de valoarea coeficientului de siaj, diferit la model și la natură, acesta trebuie determinat atât pentru nava la scară naturală, cât și pentru scara de modelare experimentală considerată, context, în care, două seturi de rezultate au fost obținute, coeficientului de influență a corpului la natură- $\eta_{Hs}$  și coeficientului de influență a corpului la model- $\eta_{Hm}$  fiind determinat.

Este înregistrată, astfel, o valoare calculată de 1.335 pentru  $\eta_{Hm}$ , respectiv o valoare dată de 1.164 pentru  $\eta_{Hs}$ , singura eroare de comparație, determinată în raport cu coeficientului de influență a corpului la natură, fiind egală cu 0.052%.

### V.5.5. Coeficientul cvasipropulsiv

Dependent de randamentul elicei în apă liberă- $\eta_0$ , diferit la model și la natură, coeficientul cvasipropulsiv poate fi determinat atât pentru nava la scara 1:1- $\eta_{Ds}$ , cât și pentru carena model- $\eta_{Dm}$ .



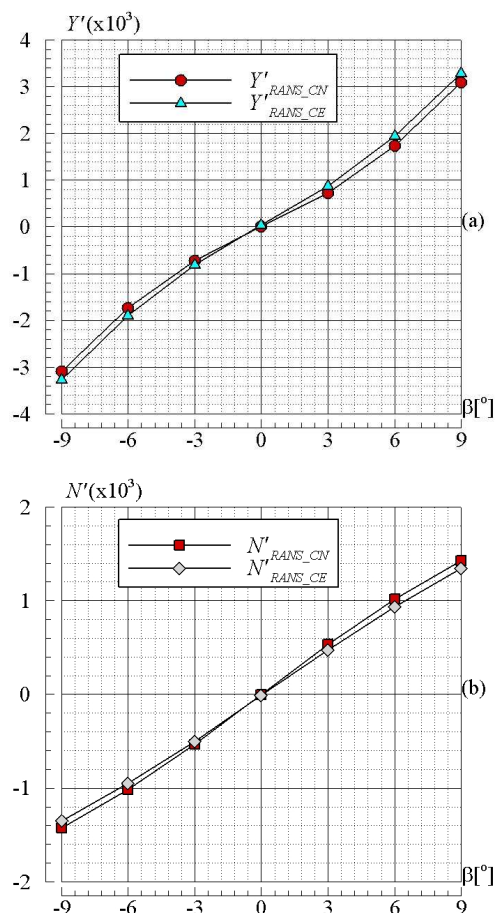
Calculul numeric redă, astfel, un  $\eta_{Dm}$  egal cu 0.698, respectiv un  $\eta_{Ds}$  definit de 0.781, o eroare de comparație de  $-7.576\%$  fiind calculată în corespondența coeficientului cvasipropulsiv la natură. Cea mai mare influență este, în mod evident, a randamentului relativ de rotație, randamentul elicei în apă liberă, transpus la scară naturală, fiind caracterizat de  $4.038\%$  eroare de comparație.

Se poate, așadar, concluziona că prezentele rezultatele computaționale furnizează soluția analizei numerice a performanțelor propulsive dezvoltate de elicea activă, în siajul navei, evidențiată fiind acuratețea programului utilizat. Având la bază calculele de tip *CFD*, realizate cu ajutorul solverului de tip *RANS* considerat, studiul de față oferă rezultate similare testului de autopropulsie, o alternativă numerică a acestei metodologii de tip experimental fiind, în acest context, prezentată.

## V.6. Forțele hidrodinamice laterale și momentele hidrodinamice pe corpul navei echipate cu elice

Determinate pentru cazul de studiu al curgerii în jurul carenei nude, forța laterală adimensională și momentul adimensional de rotație în plan orizontal sunt investigate și din perspectiva considerării ansamblului corp–elice. O atenție deosebită este acordată modului în care elicea activă influențează magnitudinea și desfășurarea acestor mărimi hidrodinamice de interes.

Solverul de tip *RANS* utilizat este considerat alături de modelul teoretic al liniei portante cu scopul de a determina valorile  $Y'$ , respectiv  $N'$ . Este prezentată, în acest sens, figura V.7.



**Figura V.7.** Evoluția, în raport cu unghiul de derivă, a  $Y'$  (a), respectiv  $N'$  (b) pentru cazul carenei nude (CN) și al navei echipate cu elice (CE)

Este observat faptul că, elicea nu modifică, în mod substanțial magnitudinea  $Y'$ , respectiv  $N'$ .

## V.7. Concluzii asupra studiului curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice

Urmărind studiul curgerii care se dezvoltă în jurul corpului navei echipate cu elice, prezentul capitol oferă soluțiile simulărilor numerice efectuate în direcția investigării hidrodinamice a câmpului tridimensional de curgere vâscoasă care se desfășoară în lungul carenei propulsate, atât la navigația pe drum drept, cât și în timpul unei situații de manevră, precum și în direcția determinării mărimilor hidrodinamice de interes. Efectul propulsiv și rotațional al elicei active este, în toate cazurile, evidențiat.

Validarea metodologiei de calcul al elicei este realizată prin comparație cu rezultatele experimentale de elice în apă liberă furnizate de *MOERI*. În plus, soluțiile obținute pentru coeficienții de propulsie ai navei model *KVLCC2* de Kim *et al.* (2001) sunt utilizate pentru a valida tehnica de autopropulsie considerată pe baza solverului de tip *CFD*. Acuratețea calculului computațional, demonstrată prin comparații, justifică implementarea acestei tehnici numerice în direcția dezvoltării unei alternative a testelor de autopropulsie.

Cu toate că rezultatele numerice prezentate în cadrul acestui capitol oferă o serie de informații de interes în raport cu structura câmpurilor de viteze și presiuni din jurul corpului navei acoperind, în acest fel, o arie importantă de studiu în domeniul hidrodinamicii navale, complexitatea soluțiilor obținute pe fondul efectului combinat elice activă–curent incident transformă procesul de interpretare într-unul dificil. Astfel, considerând curgerea incidentă care se dezvoltă în jurul configurației corp–elice, prezenta cercetare creează premisele favorabile realizării studiului curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice și cârmă. Contribuțiile aduse, prin intermediul acestui capitol, în raport cu hidrodinamica curgerii turbulente care descrie spațiul de funcționare a propulsorului în timpul unei mișcări de “derivă statică” recomandă prezenta cercetare doctorală.

Acționând în direcția realizării unei analize numerice a curgerii care se dezvoltă în jurul navei complet echipate, Capitolul VI va fi destinat studiului curgerii în cazul în care se consideră și efectul acțiunii suprafeței de control.

Obiectivele următorului studiu constau în determinarea influenței pe care compunerea efectelor unghi de incidență–unghi de bandare a cârmei o manifestă asupra performanțelor de rezistență la înaintare ale navei model *KVLCC2*, precum și în determinarea forței laterale adimensionale și a momentului adimensional de rotație în plan orizontal, pentru fiecare situație de curgere dată. În acest context, sunt propuse simulări numerice pentru “testele pe model captiv” de tip “derivă statică”, “cârmă statică” și “derivă și cârmă statică”.

## Capitolul VI

# Studiul curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice și cârmă

Capitolul VI prezintă rezultatele numerice obținute în cadrul procesului de investigare hidrodinamică a curgerii turbulente care se dezvoltă în condițiile de studiu definite de nava echipată cu elice și cârmă, în timpul unei mișcări de manevră. Sunt reprezentați, pentru fiecare situație de curgere incidentă dată, coeficientul rezistenței la înaintare a navei echipate cu elice și cârmă, cât și coeficienții componentelor de frecare, respectiv de presiune vâscoasă ale acesteia. De asemenea, este validată metodologia numerică de calcul al forțelor și momentelor hidrodinamice pe corpul navei, fiind prezentată o alternativă numerică a testelor cu *PMM* static, pe fondul studiului hidrodinamic al curgerii incidente.

### III.1. Cârmă–suprafață pasivă de control

“Aripi portante care se rotesc în jurul unei axe verticale, cu rolul de a controla mișcările navei în plan orizontal” (Brix, 1993), cârmele sunt de regulă poziționate în pupa corpului navei, în aval de propulsor. Scopul lor este acela de a produce ca rezultat al bandării într-un bord sau altul o forță hidrodinamică laterală și un moment de rotație în plan orizontal. Amplasarea corespunzătoare a acestora, în curentul elicei, este extrem de favorabilă dat fiind că o parte din energia vânei de fluid este reconvertită în direcția creșterii performanțelor de manevrabilitate.

### VI.2. Condiții de modelare

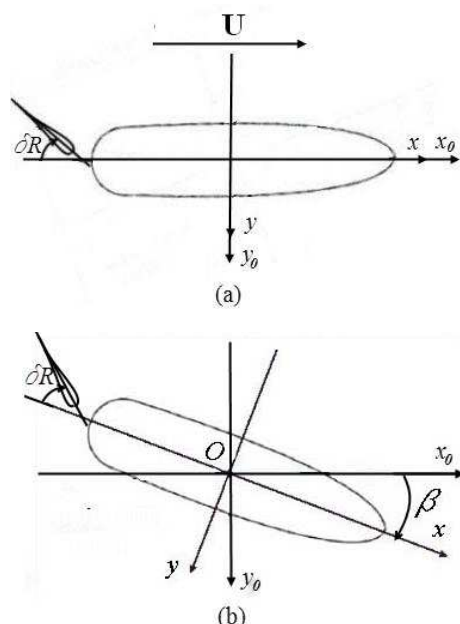
Concordant definite în raport cu metodologia experimentală considerată de *MOERI*, pentru nava echipată cu elice și cârmă în cadrul testelor cu *PMM* static, condițiile de modelare sunt descrise de considerarea, suplimentar cazurilor de studiu prezentate în cadrul **Capitolului IV**, a “testelor pe model captiv” gen “cârmă statică” și “derivă și cârmă statică”. Astfel, în mod similar metodologiei experimentale prezentate în studiul curgerii în jurul carenei nude, probele de manevrabilitate de tip “cârmă statică” și “derivă și cârmă statică” implică tractarea carenei model cu viteză constantă  $U$ , pe axa longitudinală a bazinului de manevrabilitate, unghiul de bandare a cârmei, în cazul primului set de teste de tip *PMM*, respectiv unghiul de bandare a cârmei sau unghiul de derivă, în condițiile celui de-al doilea tip de teste enunțate, fiind unicii parametri sistematic modificați (Obreja *et al.*, 2008).

Figura VI.1 prezintă o imagine a poziției pe care modelul experimental o are în timpul celor două seturi de teste.  $\beta$  este, similar cazului de studiu al curgerii în jurul carenei nude, unghiul de derivă a navei,  $\delta R$  fiind unghiul de bandare a cârmei.

Prezenta cercetare consideră pentru cazul navei echipate cu elice și cârmă, condițiile de curgere incidentă definite de modificarea, cu pas de  $3^\circ$ , între  $-9^\circ$  și  $9^\circ$ , a unghiului de derivă, de bandarea cârmei, cu  $10^\circ$ , între  $-30^\circ$  și  $30^\circ$ , și de cele patruzeci și nouă de cazuri de curgere de tip “derivă și cârmă statică” definite pe baza tuturor combinațiilor posibile  $\beta - \delta R$ .

Având aceleași dimensiuni principale, prezentate în cadrul Capitolului IV, și deplasându-se cu aceeași viteză dată de 1.047 m/s, carena model este considerată în condițiile de curgere definite de  $4.6 \times 10^6$  valoare a numărului Reynolds. Numărul Froude egal cu 0.142 permite neglijarea suprafeței libere a apei. Asieta și afundarea modelului virtual sunt blocate.

Ca și în cazul studiului curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice, în deplină concordanță cu măsurătorile *MOERI*, propulsorul funcționează la punctul de autopropulsie a navei la natură, fiind definită, în acest sens, o turație de 8.59 rps.



**Figura VI.1.** “cârmă statică” (a), “derivă și cârmă statică” (b) (*Manevrabilitatea Navei*, Obreja D. C., Crudu L., Păcuraru S.)

Curgerea în jurul corpului navei echipate cu elice și cârmă este soluționată, fiind schițate următoarele direcții de cercetare:

- introspecția de natură hidrodinamică a curgerii turbulente care descrie spațiul de operare a configurației considerate, în timpul unei situații de studiu de tip “cârmă statică”, respectiv “derivă și cârmă statică”;
- calculul, pentru toate cazurile de incidență a curentului de fluid, a coeficientului forței totale de rezistență la înaintare a carenei, precum și a componentelor de frecare, respectiv de presiune vâscoasă ale acesteia;
- validarea tehnicilor de tip *CFD* utilizate în sensul determinării forțelor și momentelor hidrodinamice pe corpul navei;
- elaborarea, pe baza metodologiilor de tip *RANS*, a unui set complet de teste de tip *PMM* static.

### **VI.3. Studiul hidrodinamic al curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice și cârmă**

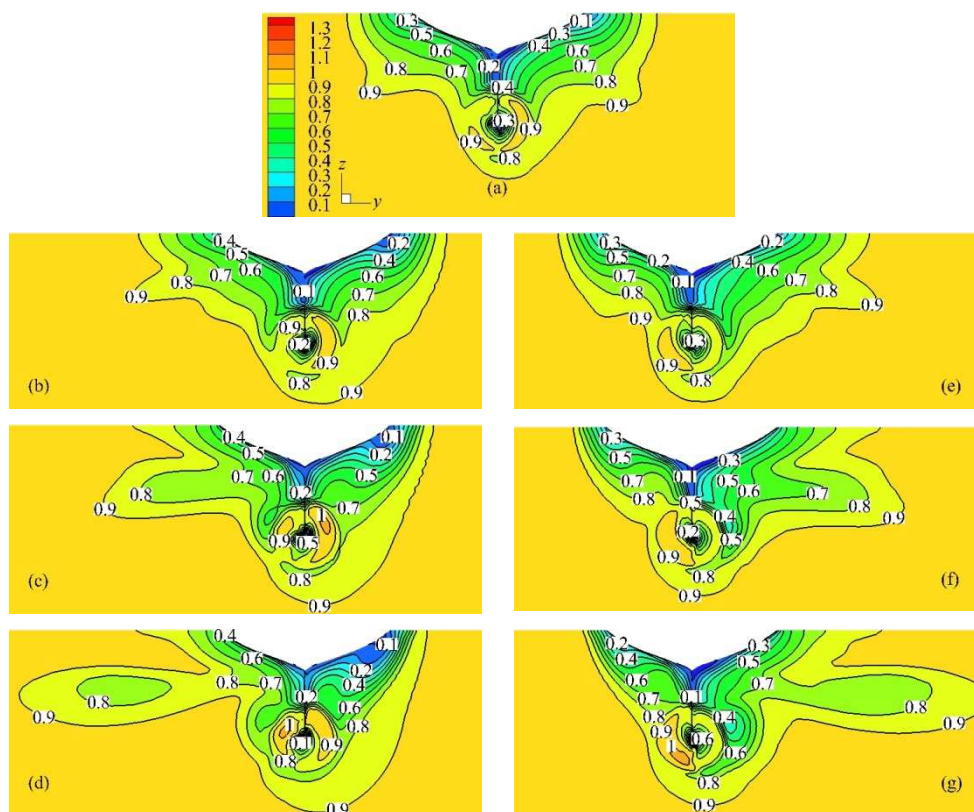
Acționând în direcția investigării hidrodinamice a câmpului de curgere vâscoasă care definește spațiul de operare a carenei complet echipate, precum și în sensul determinării influenței pe care prezența activă a cârmei o exercită în raport cu distribuția de viteze și presiuni din jurul corpului navei, prezenta etapă de cercetare consideră, ca primă etapă de analiză, pe baza condițiilor de modelare definite în cadrul paragrafului VI.2, contururile de viteze axiale din planul discului elicei. Este impusă o incidență a curentului de fluid descrisă de introducerea, pe fondul bandării cârmei cu  $30^\circ$ , a tuturor celor șapte unghiuri de derivă modificate, cu pas de  $3^\circ$ , între  $-9^\circ$  și  $9^\circ$ .

Acesta este contextul în care este considerată figura VI.2. Soluțiile introspecției hidrodinamice a curgerii incidente care se dezvoltă în jurul carenei complet echipate sunt furnizate și analizate pe baza prezentării, pentru fiecare dintre cele șapte situații de manevră descrise de combinația  $30^\circ$  unghi

de bandare a cârmei  $[-9^\circ; 9^\circ]$  unghi de derivă, a distribuției de viteze axiale din planul discului elicei.

Figura VI.2 (a) evidențiază faptul că, prin comparație cu același caz de curgere dat în contextul navei echipate cu elice, efectul propulsiv al acesteia este ușor diminuat. Astfel, bandată înspre bordul tribord, cârma acționează în sensul reducerii magnitudinii vitezelor axiale înregistrate în zona discului elicei, în corespondența feței de presiune a acesteia. O micșorare a valorilor componentelor axiale ale vitezei fluidului este observată și în partea superioară, respectiv în partea superior-exterioară a discului elicei.

În raport cu distribuția de viteze axiale din planul de funcționare a propulsorului, efectul combinat elice activă-cârmă bandată nu modifică, în mod substanțial, prin comparație cu situația de studiu al navei echipate cu elice, magnitudinea și așezarea liniilor de contur. O diminuare a valorilor înregistrate în cazul elicei active este observată în corespondența feței de presiune a cârmei, fața de suțiu a acesteia având ca efect accelerarea curentului de fluid și, în mod implicit, reducerea intensității formațiunilor vorticale din acea arie. În ceea ce privește zonele de margine ale celor șapte distribuții de viteze axiale considerate, efectul bandării cârmei este preponderent simțit așa cum o evidențiază figurile VI.2 (a)–(g).



**Figura VI.2.** Distribuția de viteze axiale din planul discului elicei, la  $0.9825L_{pp}$ , pentru  $\beta = 0^\circ$  (a),  $\beta = -3^\circ$  (b),  $\beta = -6^\circ$  (c),  $\beta = -9^\circ$  (d),  $\beta = 3^\circ$  (e),  $\beta = 6^\circ$  (f),  $\beta = 9^\circ$  (g)–vedere de la pupa spre prova (nava echipată cu elice și cârmă,  $\delta R = 30^\circ$ )

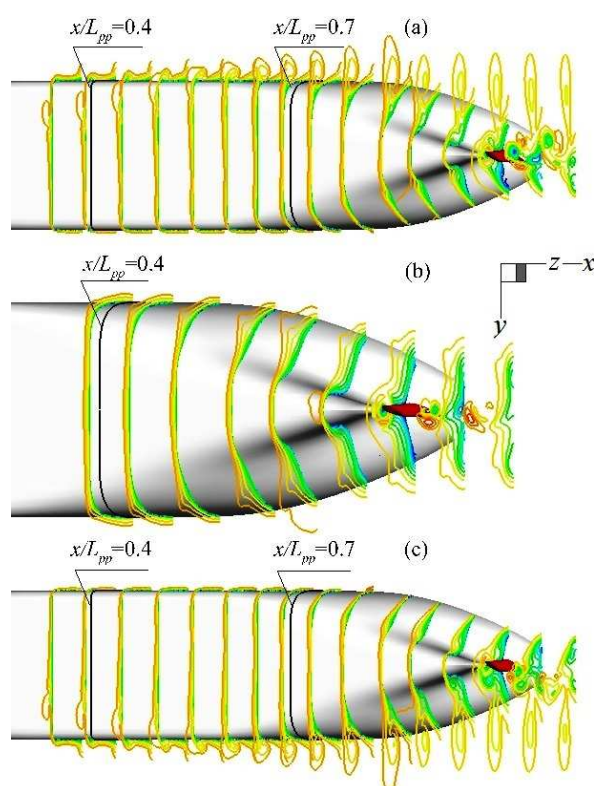
De interes fiind a se identifica evoluția pe care câmpul de curgere o manifestă în lungul corpului navei echipate cu elice și cârmă, în condițiile unghiului maxim de bandare considerat, atât pentru cazul situării navei pe drum drept, cât și pentru cazurile de incidență nenulă, este prezentată figura VI.3, evidențiat fiind, prin comparație cu rezultatele din Capitolului V, faptul că, din punct de vedere al desfășurării vitezelor axiale o manifestare similară este identificată în amonte de elice, pentru ambele configurații: corp-elice, respectiv corp-elice-cârmă. Ca și în cazul carenei nude și al navei propulsate, figura VI.3 prezintă cele două perechi de vârtejuri identic originare, în zona de gurnă, în

condițiile de curgere definite de  $\beta = 0^\circ$ . Evoluția acestora nu este modificată, de prezența activă a cârmei, pe zona de curgere din amonte de  $0.9825L_{PP}$ .

În situațiile de studiu al unghiurilor de atac egale dar de semn contrar, influența cârmei este simțită anterior planului de funcționare a propulsorului o ușoară asimetrie babord–tribord fiind introdusă în raport cu desfășurarea vârtejului de gurnă manifestat în lungul fundului navei, în bordul opus incidenței curentului.

În ceea ce privește arealul de curgere din aval de elice, pe baza figurii VI.3 (b), se poate observa că, prin bandarea sa, cârma acționează în direcția dezvoltării unui nou vârtej care, desprins de pe fața de sucțiune, din zona de vârf a acesteia, se adaugă vârtejului de gurnă identificat în zona de butuc a propulsorului în situația de curgere a navei echipate cu elice.

Investigarea curgerii incidente care se dezvoltă, în aval de elice, în cazurile de studiu definite de considerarea unui unghi de derivă diferit de zero, evidențiază faptul că, în mod asemănător situației de modelare definite de  $\beta = 0^\circ$ , cârma, prin prezența sa activă, stimulează caracterul turbulent al curgerii acționând în direcția dezvoltării unei noi formațiuni vorticale.

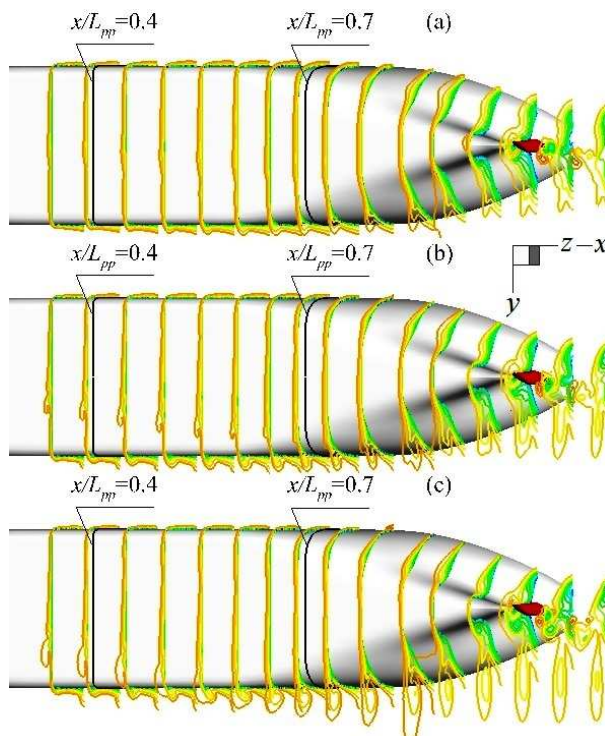


**Figura VI.3.** Evoluția, pe direcție longitudinală, a distribuției de viteze axiale, pentru  $\beta = -9^\circ$  (a),  $\beta = 0^\circ$  (b) și  $\beta = 9^\circ$  (c) – vedere asupra fundului navei (navă echipată cu elice și cârmă,  $\delta R = 30^\circ$ )

Se poate astfel, concluziona că, suplimentar celor două seturi de mișcări de natură turbionară identificate atât în cazul carenei nuda, cât și în cazul navei propulsate, bandarea cârmei, cu unghiul maxim de bandare considerat, determină apariția și dezvoltarea unei noi formațiuni de gen. Tot pe baza celor două figuri, anterior definite, este arătat și modul în care  $\delta R = 30^\circ$ , afectează evoluția axial-simetrică pe care vârtejul de gurnă, dezvoltat în lungul bordului opus incidenței curentului, o prezintă, atât pentru carena nudă, cât și pentru configurația navă–elice, în cazul unghiurilor de atac egale dar de semn contrar. Este remarcat faptul că, prin bandarea sa în bordul tribord, suprafața de control determină creșterea vitezelor axiale în zona de margine a conturilor de viteze, pe direcția de incidență a curentului, în cazul unghiurilor de derivă mai mici decât zero.

Funcționând în spatele navei, în aval de elice, cârma semnificativ bandată cu  $\delta R = 30^\circ$  modifică contururile de viteze axiale, atât în zona discului elicei, cât și în exteriorul acesteia.

Urmând parcursul Capitolului IV, respectiv al Capitolului V, este considerată figura VI.4, fiind, pe baza acesteia, determinată poziția pe care originea vârtejurilor de gurnă, desfășurate pe direcția de incidență a curenților de fluid, o ocupă în lungul axei  $Ox$ . Este evidențiat faptul că prezența activă a cârmei nu modifică zona de origine a formațiunilor considerate, în mod similar cazurilor de studiu, aprioric, prezentate intensitatea acestora variind proporțional cu creșterea incidenței curenților. De asemenea, respectând aceleași reguli identificate în etapele anterioare de cercetare, creșterea unghiului de derivă a curenților de fluid determină o deplasare, de la pupa spre prova, a originii celor două seturi de vârtejuri.



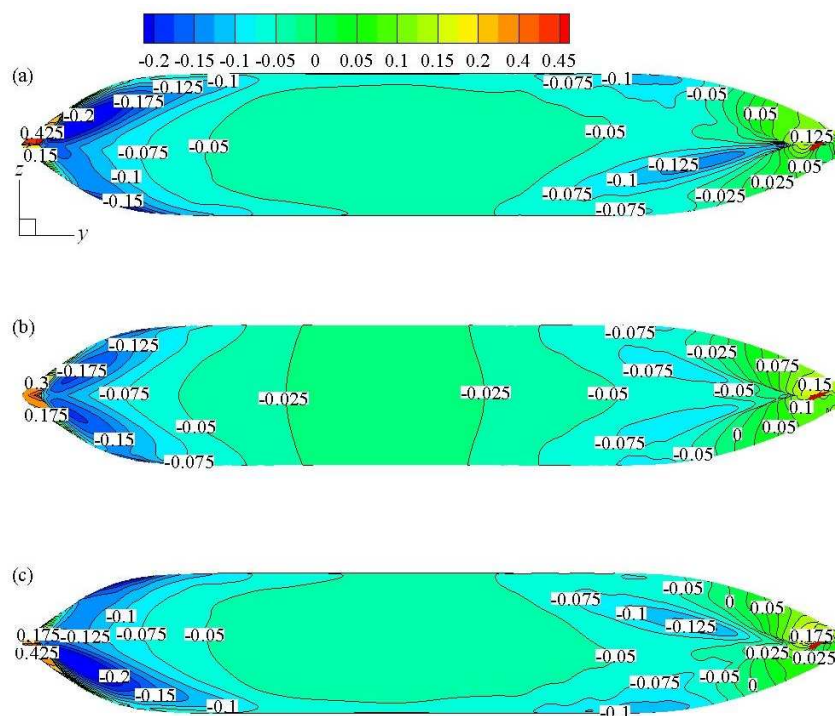
**Figura VI.4.** Evoluția, pe direcție longitudinală, a distribuției de viteze axiale, pentru  $\beta = 3^\circ$  (a),  $\beta = 6^\circ$  (b), respectiv  $\beta = 9^\circ$  (c)–vedere asupra fundului navei (navă echipată cu elice și cârmă,  $\delta R = 30^\circ$ )

Așadar, influența ansamblului elice–cârmă este substanțial simțită în zona pupa, în arealul de funcționare a propulsorului și în aval de acesta, spațiul de apariție a celor două grupe de vârtejuri de gurnă nefiind sub efectul acestora.

Considerând parcursul urmat în cadrul Capitolului IV, respectiv al Capitolului V, este făcută o analiză a distribuției de presiuni pe corpul navei. Este de interes a se identifica efectul pe care ansamblul elice–cârmă îl introduce în raport cu aceasta. În acest context, este utilizată Figura VI.5.

În mod similar concluziilor anterior prezentate, analiza distribuției de presiuni pe corpul navei evidențiază, încă o dată, faptul că efectul celor două componente active ale ansamblului elice–cârmă este resimțit numai la nivel local.

Se poate, astfel, observa conform figurii VI.5 și prin comparație cu rezultatele numerice prezentate în cadrul Capitolului V, faptul că, prin bandarea sa, cârma determină o sensibilă creștere a nivelului presiunii pe direcția de bandare, în corespondența feței de presiune, respectiv o scădere a magnitudinii acesteia în bordul babord, în corespondența feței de sucțiune. Soluțiile date sunt în deplină concordanță cu rezultatele prezentate pentru distribuția de viteze axiale din jurul corpului navei echipate cu elice și cârmă.

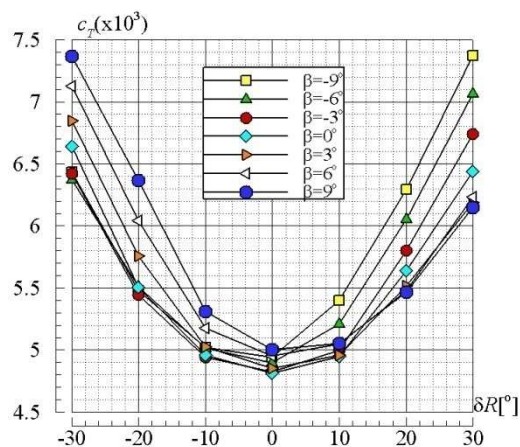


**Figura VI.5.** Distribuția de presiuni pe corpul navei pentru  $\beta = -9^\circ$  (a),  $\beta = 0^\circ$  (b), respectiv  $\beta = 9^\circ$  (c) – vedere asupra fundului navei (navă echipată cu elice și cârmă,  $\delta R = 30^\circ$ )

Prezentul capitol consideră și calculul coeficientului forței totale de rezistență la înaintare a modelului experimental *KVLCC2* și a componentelor de frecare, respectiv de presiune vâscoasă ale acesteia, pentru toate cazurile de modelare definite în cadrul paragrafului VI.2.

#### VI.4. Rezistența la înaintare a navei echipate cu elice și cârmă în curent incident

Coeficientul rezistenței totale la înaintare, precum și coeficienții rezistenței de frecare, respectiv de presiune vâscoasă sunt aflați, în contextul prezentului studiu, pentru toate situațiile de incidență definite de combinațiile unghi de atac al curentului de fluid – unghi de bandare a cârmei.



**Figura VI.6.** Variația, în raport cu combinația unghi de derivă – unghi de bandare a cârmei, a coeficientului rezistenței totale la înaintare a carenei model *KVLCC2* (navă echipată cu elice și cârmă)



Efectul de majorare a  $c_F$ , pe care îl induce unica considerare a unghiului de derivă, este atenuat de bandarea cârmei, evoluția, în raport cu valoarea absolută a lui  $\delta R$ , a acestuia fiind una invers proporțională.

De asemenea, cârma, prin prezența sa activă, influențează evoluția componentei de formă. În cazurile de studiu descrise de bandarea acesteia în bordul babord,  $c_{PV}$  crește odată cu îndepărtarea de zero a unghiului de derivă, în raport cu bandarea în bordul tribord, o scădere a acestuia fiind înregistrată odată cu creșterea  $\beta$ .

Aceeași evoluție este resimțită și în cazul coeficientului rezistenței totale la înaintare, așa cum o evidențiază figura VI.6.

Având ca principală direcție de cercetare studiul curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice și cârmă, prezenta lucrare doctorală consideră, suplimentar introspecției hidrodinamice a curgerii care se dezvoltă în jurul unor configurații de interes și suplimentar rezultatelor obținute în raport cu calculul și evoluția performanțelor de rezistență la înaintare ale carenei date, validarea metodologiilor de tip *RANS* utilizate în cadrul procesului de determinare a forțelor și momentelor pe corpul navei. Este, în acest context, prezentată o alternativă numerică a testelor cu *PMM* static.

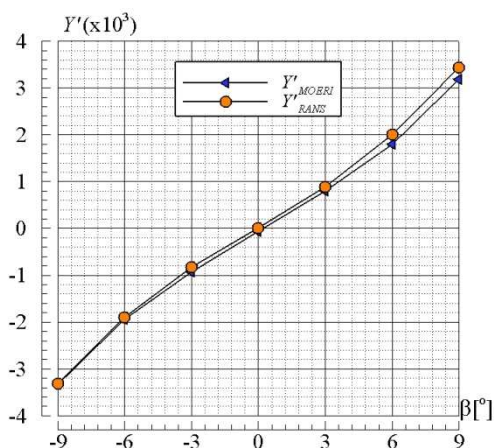
## VI.5. Forțele hidrodinamice laterale și momentele hidrodinamice pe corpul navei echipate cu elice și cârmă

De maximă importanță, prezenta cercetare consideră, pe fondul studiului curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice și cârmă, determinarea, pentru toate cazurile de incidență a curentului de fluid descrise de considerarea efectului combinat unghi de derivă–unghi de cârmă, a forțelor și momentelor hidrodinamice pe corpul navei, fiind făcută o validare prealabilă a metodologiei de calcul numeric.

Așadar, considerând rezultatele experimentale furnizate, în raport cu cele trei tipuri de teste de tip *PMM* static, de către *MOERI*, la *SIMMAN 2008*, este făcută o validare a soluțiilor numerice obținute. Sunt considerate în acest sens figurile VI.7–VI.9, respectiv tabelele VI.1–VI.5.

### VI.5.1. Validarea metodologiei numerice de tip “derivă statică”

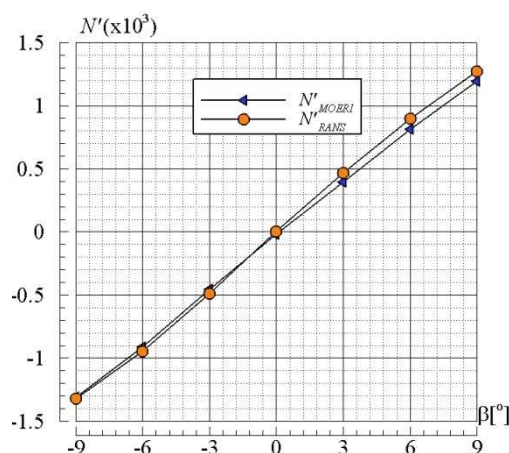
Figurile VI. 7, respectiv VI.8 prezintă evoluția, în raport cu unghiul de derivă, variat, cu pas de  $3^\circ$ , între  $-9^\circ$  și  $9^\circ$ , a forței laterale adimensionale și a momentului adimensional de rotație în plan orizontal.



**Figura VI.7.** Evoluția, în raport cu unghiul de derivă, a  $Y'$  (numeric, experiment) (navă echipată cu elice și cârmă)

Tabelul VI.1 redă eroarea de comparație *EFD–CFD* pentru  $Y'$ , respectiv  $N'$  pentru testele de tip “derivă statică” considerate. Analiza celor două seturi de rezultate evidențiază manifestarea

similară pe care cele două curbe, trasate în corespondența calculului numeric, respectiv a măsurătorilor experimentale, o dovedesc, fiind, în acest context, făcută o validare calitativă a soluției *CFD*.



**Figura VI.8.** Evoluția, în raport cu unghiul de derivă, a  $N'$  (numeric, experiment) (navă echipată cu elice și cârmă)

**Tabelul VI.2.** Eroarea de comparație *EFD–CFD* pentru  $Y'$ , respectiv  $N'$  pentru “derivă statică”

$\beta [^\circ]$	$E\%Y'_{MOERI}$	$E\%N'_{MOERI}$
-9	0.334%*	-0.928%*
-6	2.070%	-3.476%
-3	11.325%*	-7.996%*
0	–	–
3	-11.537%*	-17.586%*
6	-11.555%	-10.850%
9	-7.938%*	-6.855%*

\*valori obținute prin interpolare

Se impune o abordare judicioasă a cazurilor de derivă descrise de cele mai mici valori ale unghiurilor de atac ale curentului de fluid, cele mai mari erori de comparație fiind identificate, similar configurației analizate în cadrul Capitolului IV, în corespondența  $\beta = \pm 3^\circ$ . Soluțiile prezentate, pentru aceleași valori ale incidenței curentului, pentru cazul carenei nude, de Eca *et al.* (2005) susțin continuarea studiului, fiind, în continuare, considerată validarea metodologiei de calcul al forțelor și momentelor hidrodinamice care se dezvoltă pe corpul navei, într-o situație de manevră de tip “cârmă statică”.

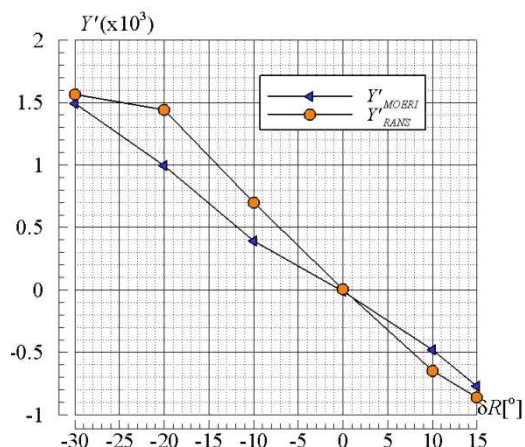
### VI.5.2. Validarea metodologiei numerice de tip “cârmă statică”

Figurile VI.9, respectiv VI.10 prezintă evoluția, în raport cu unghiul de bandare a cârmei, variat, cu pas de  $5^\circ$ , în intervalul de studiu definit de  $[-30^\circ; 15^\circ]$ , a forței laterale adimensionale și a momentului adimensional de rotație în plan orizontal. Analiza comparativă a celor două seturi de rezultate *CFD–EFD* este făcută atât pe baza celor două figuri, cât și pe baza erorilor de comparație prezentate, pentru fiecare caz de curgere modelat, în cadrul tabelului VI.2.

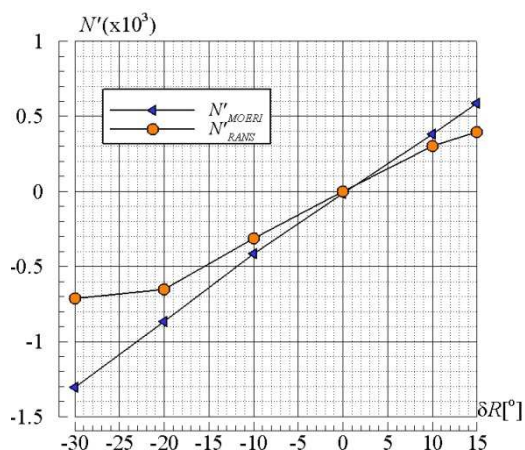
Este, astfel, relevat faptul că cele două curbe au o evoluție similară, fiind, în aceste condiții, realizată o validare calitativă a rezultatelor *RANS*.

În situațiile de curgere definite de  $\delta R = -10^\circ$ , respectiv  $\delta R = -30^\circ$ , valorile determinate pe baza tehnicilor computaționale prezintă, prin comparație cu forțele și momentele adimensionale aflate

în cadrul testelor experimentale, cele mai mari erori egale cu  $-77.820\%$  pentru  $Y'$ , respectiv cu  $45.297\%$  pentru  $N'$ .



**Figura VI.9.** Evoluția, în raport cu unghiul de bandare a cârmei, a  $Y'$  (numeric, experiment) (navă echipată cu elice și cârmă)



**Figura VI.10.** Evoluția, în raport cu unghiul de bandare a cârmei, a  $N'$  (numeric, experiment) (navă echipată cu elice și cârmă)

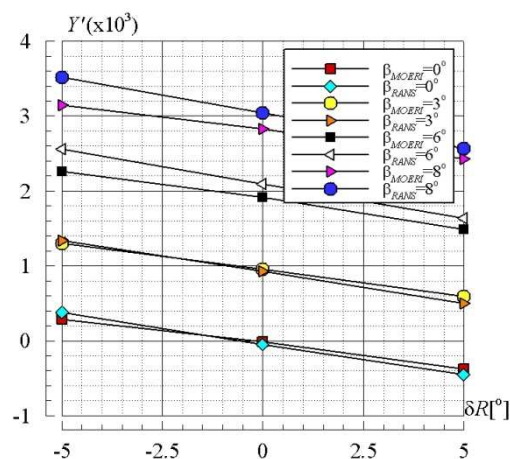
Deși mari valorile lui  $E$  pot fi justificate, soluțiile numerice calculate pentru  $\delta R = 10^\circ$ , în cadrul *SIMMAN 2008* (Stern *et al.*, 2011), prezentând o eroare de comparație de  $50.1\%$  pentru forța laterală adimensională, respectiv o eroare de comparație de  $-36.5\%$  pentru momentul adimensional de rotație în plan orizontal.

<b>Tabelul VI.2.</b> Eroarea de comparație <i>EFD-CFD</i> pentru $Y'$ , respectiv $N'$ pentru "cârmă statică"		
$\delta R [^\circ]$	$E\%Y'_{MOERI}$	$E\%N'_{MOERI}$
-30	-4.842%*	45.297%*
-20	-45.046%*	24.558%*
-10	-77.820%*	24.431%*
0	—	—
10	-35.671%*	21.182%*
15	-11.517%*	32.778%*

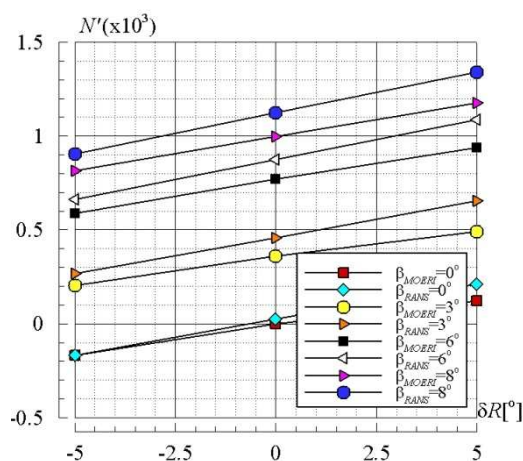
\*valori obținute prin interpolare

### VI.5.3. Validarea metodologiei numerice de tip “derivă și cârmă statică”

Urmând același parcurs prezentat în cadrul paragrafelor anterioare, este considerată validarea tehnicilor de tip *CFD* utilizate în procesul de simulare a testelor cu *PMM* de tip “derivă și cârmă statică”, fiind utilizate rezultatele experimentale făcute publice de *MOERI*, la *SIMMAN 2008*, pentru o serie de combinații unghi de atac al curentului de fluid–unghi de bandare a cârmei.



**Figura VI.11.** Analiza comparativă numeric–experiment pentru forța adimensională laterală calculată în corespondența situațiilor de manevră de tip “derivă și cârmă statică” considerate



**Figura VI.12.** Analiza comparativă numeric–experiment pentru momentul adimensional de rotație în plan orizontal calculat în corespondența situațiilor de manevră de tip “derivă și cârmă statică” considerate

Este prezentată, astfel, pe baza figurilor VI.11, respectiv VI.12, o analiză comparativă a evoluției pe care, pentru fiecare unghi de derivă aprioric definit, forța laterală adimensională și momentul adimensional de rotație în plan orizontal o descrie în raport cu unghiul de bandare a cârmei. Sunt considerate, în direcția prezentării, pentru fiecare  $\delta R$  dat, a erorii de comparație *CFD–EFD*, tabelele VI.3, VI.4, respectiv VI.5.

Trebuie menționat că, din punct de vedere al condițiilor de modelare experimentală abordate în cadrul “testelor pe model captiv” de tip “derivă și cârmă statică”, rezultatele *MOERI* sunt date în corespondența unei viteze a carei model *KVLCC2* egală cu 0.6979 m/s, un număr Reynolds de  $3.067 \times 10^6$  guvernând, în acest context, curgerea vâscoasă tridimensională. Aceleași condiții sunt, așadar, impuse și în cazul simulărilor de tip *RANS*. Analiza celor două figuri prezentate relevă faptul că, din punct de vedere calitativ, este realizată validarea calculului numeric, cele două seturi de curbe considerate evidențind o manifestare similară.

Continuând, în direcția validării cantitative a soluțiilor RANS, tabelele VI.3–VI.5 sunt prezentate.

**Tabelul VI.3.** Eroarea de comparație EFD–CFD pentru  $Y'$ , respectiv  $N'$  pentru “derivă și cârmă statică”,  $\delta R = -5^\circ$

$\beta [^\circ]$	$E\%Y'_{MOERI}$	$E\%N'_{MOERI}$
0	23.537%*	1.000%*
3	2.972%*	24.176%*
6	11.543%*	11.137%*
8	10.538%*	9.926%*

\*valori obținute prin interpolare

**Tabelul VI.4.** Eroarea de comparație EFD–CFD pentru  $Y'$ , respectiv  $N'$  pentru “derivă și cârmă statică”,  $\delta R = 0^\circ$

$\beta [^\circ]$	$E\%Y'_{MOERI}$	$E\%N'_{MOERI}$
0	–	–
3	-3.328%*	21.502%*
6	8.211%*	11.868%*
8	6.842%*	11.220%*

\*valori obținute prin interpolare

**Tabelul VI.5.** Eroarea de comparație EFD–CFD pentru  $Y'$ , respectiv  $N'$  pentru “derivă și cârmă statică”,  $\delta R = 5^\circ$

$\beta [^\circ]$	$E\%Y'_{MOERI}$	$E\%N'_{MOERI}$
0	15.034%*	41.938%*
3	-18.496%*	24.747%*
6	8.979%*	13.586%*
8	5.194%*	12.174%*

\*valori obținute prin interpolare

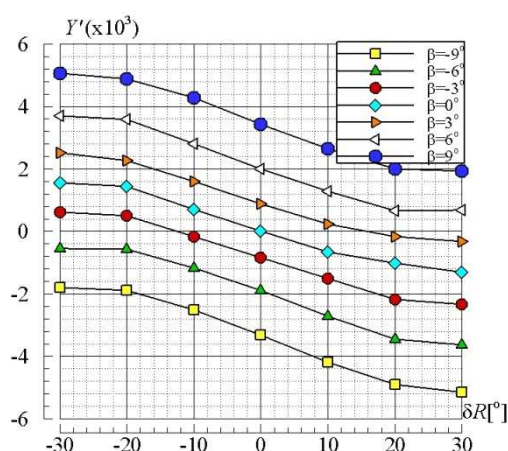
Analiza comparativă a soluțiilor numerice și experimentale acționează în direcția validării metodologiei de tip RANS utilizate în direcția determinării forțelor și momentelor hidrodinamice adimensionale care se dezvoltă pe corpul navei în timpul unei mișcări de manevră de tip “derivă și cârmă statică”. Este prefigurată, în acest context, posibilitatea dezvoltării și implementării unei alternative numerice a “testelor pe model captiv”.

#### VI.5.4. PMM virtual

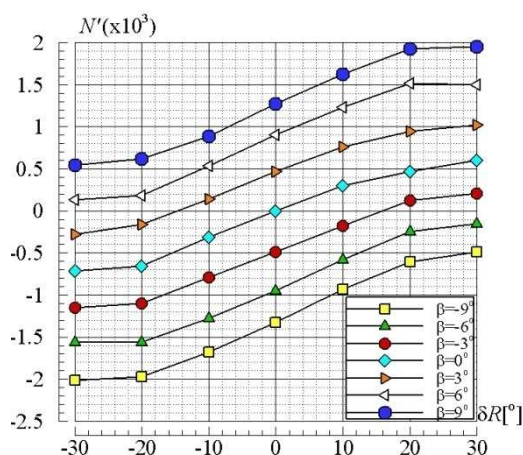
Urmărind implementarea tehnicilor de tip CFD în direcția soluționării manevrabilității navei, prezenta etapă de cercetare redă, ca prim pas făcut în acest sens, rezultatele numerice obținute, în raport cu forța laterală adimensională, respectiv cu momentul adimensional de rotație în plan orizontal, în corespondența unui set complet de teste de tip PMM static. Sunt considerate, în acest context, figurile VI.13, respectiv VI.14, soluțiile numerice determinate pe baza tehnicilor de tip RANS, pentru  $Y'$ , respectiv  $N'$ , fiind furnizate pentru fiecare combinație de studiu definită de un unghi de atac al curentului de fluid variat, cu pas de  $3^\circ$ , între  $-9^\circ$  și  $9^\circ$ , respectiv de un unghi de bandare a cârmei modificat, cu  $10^\circ$ , între  $-30^\circ$  și  $30^\circ$ .

Analiza celor două seturi de rezultate numerice evidențiază faptul că acestea respectă cu fidelitate alura pe care soluții experimentale obținute pe baza unei metodologii de tip “model captiv” o

prezintă, magnitudinea  $Y'$ , respectiv  $N'$ , fiind, de asemenea, în deplină concordanță cu rezultatele de tip *EFD* prezentate în cadrul paragrafelor anterioare.



**Figura VI.13.** Evoluția, în raport cu combinația  $\beta - \delta R$ , a forței laterale adimensionale



**Figura VI.14.** Evoluția, în raport cu combinația  $\beta - \delta R$ , a momentului adimensional de rotație în plan orizontal

Se poate, astfel, concluziona că tehnicile de tip *CFD* pot fi utilizate în cadrul procesului de proiectare gradul de dezvoltare pe care acestea îl prezintă, în stadiul actual al cunoașterii, recomandându-le ca pe o viitoare alternativă fiabilă, mai puțin consumatoare de timp și bani, a testelor cu *PMM* static.

Prezentate în cadrul acestei etape avansate de cercetare, soluțiile obținute pe baza primului set complet de “*teste pe model captiv*” vin în sprijinul acestei afirmații.

## VI.6. Concluzii asupra studiului curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice și cârmă

Având drept principal obiectiv studiul curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice și cârmă, prezenta etapă de cercetare acționează în direcția investigării hidrodinamice a acesteia. Carena model *KVLCC2* prevăzută cu elice și cârmă este considerată într-o situație de incidență de tip “*derivă și cârmă statică*”. Prefigurat fiind de studiul curgerii în jurul carenei nude, respectiv de studiul curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice, Capitolul VI consideră, suplimentar ansamblului corp-elice, nava echipată cu cârmă. Acțiunea acesteia este, în această manieră, evidențiată.

Astfel, pe fondul declarării unui unghi de atac al curentului de fluid variat, cu pas de  $3^\circ$ , între  $-9^\circ$  și  $9^\circ$ , este determinat efectul suprafeței de control. În acest sens, este considerată bandarea cârmei cu  $\delta R = 30^\circ$ . Acesta este contextul în care, distribuția de viteze și presiuni din jurul corpului navei echipate cu cârmă, respectiv cu elice și cârmă furnizează soluția analizei numerice a curgerii incidente care se desfășoară în jurul celor două configurații de studiu. Este efectuată o prezentare în detaliu a fenomenelor turbulente identificate în zona de operare a ansamblului elice-cârmă.

Suplimentar soluțiilor contributive prezentate în raport cu hidrodinamica curgerii care se dezvoltă în jurul navei complet echipate, prezentul capitol acționează în direcția determinării performanțelor de rezistență la înaintare ale carenei date. Este considerată, în acest scop, prezentarea, pentru fiecare combinație unghi de atac al curentului de fluid-unghi de bandare a cârmei, a coeficientului rezistenței totale la înaintare, precum și a coeficienților componentelor de frecare, respectiv de presiune vâscoasă ale acesteia,.

De asemenea, urmând obiectivele trasate în cadrul Capitolului I, prezenta etapă de cercetare aduce o serie de contribuții în domeniu, atât prin intermediul rezultatelor aflate în raport cu validarea metodologiei de tip *RANS* utilizate în procesul de simulare a “*teste pe model captiv*”, cât și prin setul complet de rezultate computaționale obținut pe baza unei metodologii de tip *PMM* virtual. În acest context, este evidențiată posibilitatea implementării acestui tip de tehnici numerice în procesul de determinare a manevrabilității navei.

Capitolul VII prezintă o sumă a concluziilor, contribuțiilor și perspectivelor prezentei cercetări doctorale.

# Capitolul VII

## Concluzii, contribuții și perspective

Prezenta lucrarea doctorală se încadrează în tendințele actuale de implementare a tehnicilor de tip *CFD* în cadrul procesului de investigare a curgerii vâscoase tridimensionale din jurul corpului navei echipate cu elice și cârmă, precum și în tendințele de considerare a acestui tip de tehnici numerice în direcția introducerii unei alternative a testelor experimentale de rezistență la înaintare, autopropulsie și *PMM* static. Acesta este contextul în care sunt prezentate soluțiile obținute în raport cu analiza fenomenelor turbulente care iau naștere și se dezvoltă în câmpul de curgere din jurul carenei complet sau parțial echipate, cât și în raport cu determinarea forței de rezistență la înaintare, a coeficienților de propulsie și a forțelor și momentelor hidrodinamice pe corpul navei.

Așadar, considerând soluțiile de tip *CFD* obținute atât în raport cu studiul hidrodinamic al curgerii în jurul corpului navei echipate cu elice și cârmă, cât și în raport cu simularea testelor de rezistență la înaintare, propulsie și *PMM* static, prezenta teză de doctorat susține implementarea acestor metodologii numerice în direcția dezvoltării unei alternative la testele experimentale menționate.

Astfel, pot fi enunțate următoarele concluzii:

- curgerea turbulentă în jurul unei carene de tip *VLCC* are la origine formele pline ale acesteia, zonele de gurnă ale unei astfel de nave fiind reale generatoare de vârtejuri;
- atât în condițiile situării navei pe drum drept, cât și în celelalte situații de incidență analizate, sunt identificate două seturi de vârtejuri de gurnă care prezintă aceeași origine dar evoluții diferite în zona de funcționare a ansamblului elice-cârmă;
- creșterea unghiului de atac al curentului de fluid acționează în direcția deplasării, spre prova, a originii vârtejurilor de gurnă dezvoltate în bordul opus incidenței curentului;
- prin bandarea cârmei cu  $30^\circ$  în bordul tribord apar noi formațiuni de tip vortical ce își găsește originea pe fața de sucțiune, în zona de vârf a penei cârmei;
- efectul elicei și al cârmei este unul local, acțiunea acestora, redată pe baza solverului de tip *RANS*, fiind preponderent simțită în aval de planul de funcționare al propulsorului și prea puțin în amonte de acesta;
- tehnicile de tip *CFD* pot fi implementate în direcția determinării performanțelor de rezistență la înaintare, propulsie și manevrabilitate ale unei nave date, o atenție deosebită cerându-se a fi acordată modului de generare a rețelelor de discretizare.

Având drept direcție principală de studiu analiza hidrodinamică a curgerii incidente care se dezvoltă în jurul corpului navei echipate cu elice și cârmă, prezenta teză de doctorat se încadrează în stadiul actual al cunoașterii, putând fi evidențiate următoarele contribuții:

- validarea metodologiilor de tip *CFD* utilizate în direcția investigării câmpului tridimensional de curgere din jurul carenei navale;
- prezentarea, în detaliu, a rezultatelor numerice obținute în raport cu studiul hidrodinamic al curgerii care se dezvoltă în jurul carenei nude, al navei echipate cu elice și al navei echipate cu elice și cârmă, la navigația pe drum drept, cât și în timpul unei situații de manevră;



- prezentarea rezultatelor numerice obținute în raport cu influența pe care elicea și/sau cârmă o exercită asupra câmpului tridimensional de curgere vâscoasă din jurul carenei benchmark considerate, precum și asupra performanțelor hidrodinamice studiate;
- validarea tehnicilor de tip *CFD* utilizate în sensul determinării rezistenței la înaintare a carenei considerate;
- validarea tehnicilor de tip *CFD* utilizate în sensul determinării coeficienților de propulsie ai carenei în studiu;
- validarea tehnicilor de tip *CFD* utilizate în sensul determinării forțelor și momentelor hidrodinamice pe corpul navei;
- elaborarea, pe baza metodologiilor de tip *RANS*, a unui set complet de teste de tip *PMM* static.

Se poate, astfel, concluziona că, în contextul științific internațional, prezenta cercetare doctorală consideră o serie de subiecte de actualitate. Atât investigarea hidrodinamică a câmpului tridimensional de curgere vâscoasă care se dezvoltă în jurul configurațiilor date, în condițiile de curgere definite în cadrul Capitolelor IV, V și VI, cât și soluțiile numerice prezentate în raport cu calculul performanțelor de rezistență la înaintare, propulsie și manevrabilitate ale navei tanc considerate se încadrează în stadiul actual al cunoașterii.

În acest context, este evidențiat gradul de dezvoltare pe care metodologiile de tip *RANS* l-au atins la nivelul anului 2012, fiind redată abilitatea acestora de a pătrunde însăși esența fenomenelor turbulente care iau naștere și se dezvoltă în lungul unei carene navale, atât la navigația pe drum drept, cât și în timpul unei situații de manevră. Ideea implementării acestui tip de metodologii în direcția introspecției hidrodinamice a câmpului tridimensional de curgere din jurul unei carene date, precum și în direcția determinării, respectiv a investigării interacțiunilor care apar între navă, elice și cârmă, este argumentată, pe baza rezultatelor prezentate.

Utilizând tehnicile numerice prezentate a fost posibilă determinarea performanțelor de rezistență la înaintare și propulsie ale navei în studiu, fiind realizată validarea metodologiilor implementate în acest sens. De asemenea, aceleași scheme de calcul au stat la baza modelării testelor de tip *PMM* virtual care permit autoarei prezentei cercetări să raporteze primul set complet de soluții de acest tip. Rezultatele prezentate în lucrare susțin posibilitatea implementării, în cadrul procesului de proiectare asistată, a metodologiilor de analiză numerică aplicate.

Pentru continuarea cercetărilor, sunt considerate o serie de direcții de studiu reprezentate de determinarea derivatelor hidrodinamice ale navei *KVLCC2* și, în mod implicit, de determinarea performanțelor de manevrabilitate ale acesteia. În opinia autoarei prezentei teze, pe același fond al simulării manevrabilității navei, studiul comportării dinamice a acesteia ar putea fi de un real interes științific.

*Rezultatele obținute au fost diseminate pe parcursul elaborării prezentei teze de doctorat. Au fost publicate 8 lucrări, dintre care 3 în reviste de specialitate indexate BDI și 5 în volumele unor manifestări științifice internaționale indexate ISI. În plus, o lucrare a fost comunicată la o conferință internațională în Italia.*

**Bibliografie**

1. Abdel-Maksoud, M., Menter, F., Rieck, K., 2000, “*Unsteady numerical investigation of the turbulent flow around the container ship model (KCS) with and without propeller*”, Gothenburg 2000–A Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics, Gothenburg, Suedia.
2. Alessandrini, B., Delhommeau, G., 1999, “*A fully coupled Navier–Stokes solver for calculation of turbulent incompressible free surface flow past a ship hull*”, International Journal of Numerical Methods in Fluids, Vol. 29, Issue 2, pp.125–142.
3. Amoraritei, M., 2008, “*Complemente de hidrodinamica elicelor navale in curent neuniform*”, Galati University Press, Galați, România.
4. Anderson, J.D., 1995, “*Computational Fluid Dynamics: the basics with applications*”, McGraw–Hill, New York, SUA.
5. Andrei, I. V., 2003, “*Mecanica fluidelor*”, Vol. 1, Editura Fundației Universitare “Dunărea de Jos”, Galați, România.
6. Andrei, I. V., 2005, “*Mecanica fluidelor*”, Vol. 2, Editura Fundației Universitare “Dunărea de Jos”, Galați.
7. Andrei, I. V., 2005, “*Mecanica fluidelor*”, Vol. 3, Editura Fundației Universitare “Dunărea de Jos”, Galați.
8. Baldwin, B. S., Barth, T. J., 1990, “*A one–equation turbulence transport model for high Reynolds number wall–bounded flows*”, NASA TM 102847.
9. Baldwin, B. S., Lomax, H., 1978, “*Thin layer approximation and algebraic model for separated turbulent flows*”, AIAA Paper 78–257.
10. Bertram, V., 2000, “*Practical ship hydrodynamics*”, Butterworth Heinemann, Oxford, Anglia.
11. Bertram, V., Schneekluth, H., 1998, “*Ship design for efficiency and economy*”, Butterworth Heinemann, Oxford, Anglia.
12. Betz, A., 1919, “*Ergebn. aerodyn. Vers. Anst Gottingen*”, Gottingen.
13. Boussinesq, T. V., 1877, “*Memoires presentes par divers savants*”, Vol. 23.
14. Breslin, J. P., Anderson, P., 1994, “*Hydrodynamics of ship propellers*”, Cambridge University Press, Anglia.
15. Brix, J., 1993, “*Manoeuvring Technical Manual*”, Seehafen Verlag, Hamburg.
16. Broadhead, B. L., Rearden, B. T., Hopper, C. M., Wagschal, J. J., Parks, C. V., 2004, “*Sensitivity– and uncertainty– based criticality safety validation techniques*”, Nuclear Science and Engineering, Vol. 146, pp. 340–366.
17. Broglia, R., Muscari, R., Di Mascio, A., 2005, “*Computations of free surface turbulent flows around ship hulls by a RANS solver*”, CFD Workshop Tokyo 2005, Tokyo, Japonia.
18. Bugalski, T., Hoffmann, P., 2011, “*Numerical simulation of the self–propulsion model tests*”, 2<sup>nd</sup> International Symposium on Marine Propulsors, Hamburg, Germania.
19. Carlton, J., 2007, “*Marine propellers and propulsion*”, Butterworth Heinemann, Oxford, Anglia.
20. Carlton, J., Radosavljevic, D., Whitworth, S., 2009, “*Rudder–propeller–hull interaction: the results of some recent research, in–service problems and their solutions*”, 1<sup>st</sup> International Symposium on Marine Propulsors, Trondheim, Norvegia.
21. Ceanga, V., Mocanu, C. I., Teodorescu, C., 2003, “*Dinamica sistemelor de propulsie*”, Editura Didactică și Pedagogică, București, România.
22. Cebeci, T., Kaups, K., Moser, A., 1975, “*A general method for calculating three–dimensional incompressible laminar and turbulent boundary layers. III. Three–dimensional flows in curvilinear orthogonal coordinates*”, Douglas Aircraft Division Report MDC J6867.
23. Celik, I. B., 1999, “*Introductory turbulence modeling*”, West Virginia University, SUA.
24. Celik, I., Chen, C. J., Roache, P. J., Scheurer, G., 1993, “*Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics*”, FED–ASME, Vol. 158.
25. Celik, I., Freitas, C. J., 1990, “*Benchmark test cases for Computational Fluid Dynamics*”, FED–ASME, Vol. 93.

26. Celik, I., Ghia, U., Roache, P. J., Freitas, C. J., Coleman, H., Raad P. E., 2008, “*Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization*”, ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 130, No. 7, pp.1–4.
27. Celik, I., Karatekin, O., 1997, “*Numerical experiments on application of Richardson Extrapolation with nonuniform grids*”, ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 119, No. 3, pp.584–590.
28. Chang, K. C., Patel, V. C., 1975, “*Calculation of three-dimensional boundary layers on ship forms*”, IIHR Report No. 176.
29. Chao, K. Y., 2005, “*Numerical propulsion simulation for the KCS container ship*”, CFD Workshop Tokyo 2005, Tokyo, Japonia.
30. Chen, H. C., Lin, W. M., Weems, K.M., 1994, “*Second moment RANS calculations of viscous flows around ship hulls*”, CFD Workshop for Improvement of Hull Form Designs, Tokyo, Japonia.
31. Chou, S. K, Chin, S. S., Chang, F. N., Wu, C. H., 2005, “*Computations of flow around ships with free surface or obliqued towing angle*”, CFD Workshop Tokyo 2005, Tokyo, Japonia.
32. Chung, T. J., 2010, “*Computational fluid dynamics*”, Cambridge University Press, Anglia.
33. Coleman, H. W., Stern, F., 1997, “*Uncertainties and CFD code validation*”, ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 119, No. 4, pp.795–803.
34. Coșoiu, C. I., 2008, “*Contribuții la optimizarea proiectării și funcționării agregatelor eoliene*”, Teză de Doctorat, Universitatea Tehnică de Construcții București, București, România.
35. Cura-Hochbaum, A., 2011, “*On the numerical prediction of the ship’s manoeuvring behavior*”, Ship Science and Technology, Vol. 5, No. 9, 27–39.
36. Cura-Hochbaum, A., Vogt, M., Gatchell, S., 2008, “*Manoeuvring prediction for two tankers based on RANS calculations*”, SIMMAN 2008, Copenhaga, Danemarca.
37. Daly, B. J., Harlow, F. H., 1970, “*Transport equations in turbulence*”, Physics of Fluids, Vol. 13, pp.2634–2649.
38. Davidson, L., 2011, “*An introduction to turbulence models*”, Editura Chalmers University of Technology, Gothenburg, Suedia.
39. Dawson, C., 1977, “*A practical computer method for solving ship wave problems*”, 2<sup>nd</sup> International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Berkeley, SUA.
40. Deng, G. B. , Guilmineau, E., Queutey, P., Visonneau, M., 2005, “*Ship flow simulations with the ISIS CFD code*”, CFD Workshop Tokyo 2005, Tokyo, Japonia.
41. Deng, G.B., Queutey, P., Visonneau, M., 1993, “*Navier–Stokes computations of ship stern flows: a detailed comparative study of turbulence models and discretization schemes*”, 6<sup>th</sup> International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, IOWA, SUA.
42. Deng, G.B., Visonneau, M., 1997, “*Evaluation of Eddy Viscosity and second-moment turbulence closures for steady flows around ships*”, 21<sup>st</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics, Trondheim, Norvegia.
43. DeVolder, B., Glimm, J., Grove, J. W., Kang, Y., Lee, Y., Pao, K., Sharp, D. H., Ye, K., 2002, “*Uncertainty quantification for multiscale simulations*”, ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 124, No. 1, pp.29–41.
44. Donaldson, C. D., Rosenbaum, H., 1968, “*Calculation of turbulent shear flows through closure of the Reynolds equations by invariant modeling*”, ARAP Report No. 127.
45. Drzewiecki, S., 1903, “*Des helices aeriennes, theorie generale des propulseurs heliocoidaux et methode de calcul des propulseurs pour l’air*”, Paris, Franța.
46. Dumitrescu, H., Georgescu, A., Ceangă, V., Popovici, J., Ghiță, Gh., Dumitrache, Al., Nicolescu, B., 1990, “*Calculul elicei*”, Editura Academiei Române, București, România.
47. Dyne, G., 1980, “*A note on the design of wake-adapted propellers*”, Journal of Ship Research, Vol. 24, No. 4, pp. 227–231.
48. Eca, L., Hoekstra, M., 2002, “*An evaluation of verification procedures for CFD applications*”, 24<sup>th</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics, Fukuoka, Japonia.
49. Eça, L., Hoekstra, M., Toxopeus, S.L., 2005, “*Calculation of the flow around the KVLCC2M*”, CFD workshop Tokyo, Tokyo, Japonia.

50. Eykhoff, P., 1974, “*System identification: parameter and state estimation*”, Wiley, Chicester, Anglia.
51. Fabri, L., Benedetti, L., Bouscasse, B., Gala, F. L., Lugni, C., 2006, “*An experimental study of the maneuverability of a blunt ship: the effect of the water depth*”, 9<sup>th</sup> NuTTS Numerical Towing Tank Symposium, Le Croisic, Franța.
52. Ferziger, J. H., Peric, M., 2002, “*Computational methods for Fluid Dynamics*”, Springer-Verlag.
53. Fletcher, C. A. J., 1988, “*Computational techniques for Fluid Dynamics 1*”, Springer-Verlag.
54. Fletcher, C. A. J., 1991, “*Computational techniques for Fluid Dynamics 2*”, Springer-Verlag.
55. Florea, J., Panaitescu, V., 1979, “*Mecanica fluidelor*”, Editura Didactică și Pedagogică, București, România.
56. FLOWTECH International AB, 2007, “*XCHAP—theoretical manual*”.
57. Freitas, C. J., 1994, “*Journal of Fluids Engineering editorial policy statement on the control of numerical accuracy*”, ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 115, pp.339–340.
58. Froude, R. E., 1887, “*H.M.S. “AJAX”—the alterations lately made in her. Illustrating the truthfulness of the results obtained by experiments on her model in the tank at Torquay*”, Royal United Services Institute Journal, Vol. 31, Issue 140, pp. 595–616.
59. Froude, W., 1878, “*On the elementary relation between pitch, slip, and propulsive efficiency*”, Transactions of the Institute Naval Architects, Vol. 19, pp. 47–57.
60. Gatski, T. B., Speziale, C. G., 1993, “*On explicit algebraic stress models for complex turbulent flows*”, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 254, pp. 59–78.
61. Ghose, J. P., Gokarn, R. P., 2004, “*Basic ship propulsion*”, Allied Publishers Pvt. Limited.
62. Goldstein, S., 1929, “*On the vortex theory of screw propellers*”, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, Vol. 123, No. 792, pp. 440–465.
63. Gorski, J., Coleman, R. M., 2005, “*Computations of the KVLCC2M tanker under yawed Conditions*”, CFD Workshop Tokyo 2005, Tokyo, Japonia.
64. Gotman, A., 2000, “*Navigating the wake of past efforts*”, The Journal of Ocean Technology, Vol. 2, No. 1, pp. 74–96.
65. Han, K. J., Larsson, L., Rengström, B., 2006, “*Numerical optimization of a propeller behind a ship hull at full scale*”, 26<sup>th</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics, Roma, Italia.
66. Han, K. J., 2008, “*Numerical optimization of hull/propeller/rudder configurations*”, PhD Thesis, Editura CHALMERS University of Technology, Gothenburg, Suedia.
67. Han, K. J., Larsson, L., Rengstrom, B., 2007, “*A RANS study on the interaction between a propeller and a rudder in open water*”, 10<sup>th</sup> NuTTS Numerical Towing Tank Symposium, Hamburg, Germany
68. Hess, J. L., Smith, A. M. O., 1962, “*Calculation of non-lifting potential flow about arbitrary three-dimensional bodies*”, Douglas Aircraft Report No. E. S. 40622.
69. Hinatsu, M., Ferziger, J. H., 1991, “*Numerical computation of unsteady incompressible flow in complex geometry using a composite multigrid technique*”, International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol.13, No.8, pp. 971–997.
70. Hino, T., 2005, “*The Proceedings of CFD Workshop Tokyo 2005*”, Tokyo, Japonia.
71. Hoekstra, M., 1989, “*Recent developments in a ship stern flow prediction code*”, 5<sup>th</sup> International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Hiroshima, Japonia.
72. Idelsohn, S. R., Garcia, J., Ònate, G., 2004, “*Ship hydrodynamics*”, Encyclopedia of Computational Mechanics, pp. 579–610.
73. IMO, 2009, “*MEPC.1/Circular 681/Interim guidelines on the method of calculation of the Energy Efficiency Design Index for new ships*”
74. IMO, 2009, “*MEPC.1/Circular 682/ Interim guidelines for voluntary verification of the Energy Efficiency Design Index*”
75. IMO, 2009, “*MEPC.1/Circular 683/IMO Guidance for the development of a Ship Energy Efficiency Management Plan*”

76. Ismail, B. C., 1999, "Introductory turbulence modelling", Lecture notes/Mechanical and Aerospace Engineering Department/ West Virginia University, SUA.
77. Ismail, F., Carrica, P. M., Xing, T., Stern, F., 2009, "Evaluation of linear and nonlinear convection schemes on multidimensional non-orthogonal grids with applications to KVLCC2 tanker", International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 64, Issue 8, pp. 850–886.
78. Jacquin, E., Guillermin, P. E., Drouet, A., Perdon, P., Alessandrini, B., 2006, "Simulation of unsteady ship maneuvering using free-surface RANS solver", 26<sup>th</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics, Roma, Italia.
79. Janson, C. E., 1997, "Potential flow panel methods for the calculation of free surface flows with lift", PhD Thesis, Editura Chalmers University of Technology, Gothenburg, Suedia.
80. Johnson, R. W., Hughes E. D., 1995, "Quantification of uncertainty in computational fluids dynamics", FED-ASME, Vol. 213.
81. Kim, J., Kim, K. S., Kim, G. D., Park, I. R., Van, S. H., 2006, "Hybrid RANS and potential based numerical simulation for self-propulsion performances of the practical container ship", Journal of Ship and Ocean Technology, Vol. 10, No. 4, pp. 1–11.
82. Kim, J., Park, I. R., Kim, K. S., Van, S. H., 2008, "RANS Simulations for KRISO container and VLCC tanker", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 42, No. 6, pp. 593–600.
83. Kim, J., Park, I. R., Van, S. H., 2005, "RANS computations for KRISO container ship and VLCC tanker using the WAVIS code", CFD Workshop Tokyo 2005, Tokyo, Japonia.
84. Kim, K. J., 1989, "Ship flow calculations and resistance minimization", PhD Thesis, Editura CHALMERS University of Technology, Gothenburg, Suedia.
85. Kim, S., Kim, Y., 2000, "Effects of stern hull form on the maneuverability for a tanker", MARSIM 2000, Orlando, Florida, USA.
86. Kim, W. J., Van, S. H., Kim, D. H., 2001, "Measurements of flows around modern commercial ship models", Experiments in Fluids, Vol. 31, Issue 5, pp. 567–578.
87. Kodama, Y., 1986, "A Method to assure positiveness of  $k$  and  $\epsilon$  in the computation of the  $k$ - $\epsilon$  turbulence model", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 1986, No. 160, pp. 21–27.
88. Kodama, Y., 1987, "Computation of high Reynolds number flows past a ship hull using the IAF scheme", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 1987, No. 161, pp. 25–34.
89. Kodama, Y., 1988, "Three-dimensional grid generation around a ship hull using the geometrical method", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 1988, No. 164, pp. 1–8.
90. Kodama, Y., 1989, "Grid generation and flow computation for practical ship hull forms and propellers using the geometrical method and the IAF scheme", 5<sup>th</sup> International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Hiroshima, Japonia.
91. Kodama, Y., Takeshi, H., Hinatsu, M., Hino, T., Uto, S., Hirata, N., Murashige, S., 1994, "Proceedings of the CFD Workshop", Tokyo, Japonia.
92. Kok, J. C., Spekreijse, S. P., 2000 a, "Efficient and accurate implementation of the  $k - \omega$  turbulence model in the NLR multi-block Navier-Stokes system", ECCOMAS 2000.
93. Kok, J. C., 2000 b, "Resolving the dependence on free-stream values for the  $k - \omega$  turbulence model", AIAA Journal, Vol. 38, pp. 1292–1295.
94. Kolmogorov, A. N., 1942, "Equations of turbulent motion of an incompressible turbulent fluid", Izvestiya Akademii Nauk SSSR, Vol. 6, pp. 56–58.
95. Kume, K., Hasegawa, J., Tsudaka, Y., Fujisawa, J., Fukasawa, R., Hinatsu, M., 2006, "Measurements of hydrodynamic forces, surface pressures, and wake for obliquely towed tanker model and uncertainty analysis for CFD validation", Journal of Marine Science and Technology, Vol. 11, No. 2, pp. 65–75.
96. Larsson, L., 1974, "Boundary layers of ships", SSPA Report No. 47.
97. Larsson, L., 1981, "Proceedings of the 1980 SSPA-ITTC workshop on ship boundary layers", SSPA Publication No. 90.

98. Larsson, L., Broberg, L. H., Zhang, D. H., Kim, K. J., 1989, "SHIPFLOW—A CFD system for ship design", 4<sup>th</sup> International Symposium on Practical Design of Ships and Mobile Units, Varna, Bulgaria.
99. Larsson, L., Kim, K. J., Zhang, D. H., 1989, "New viscous and inviscid CFD—techniques for ship flows", 5<sup>th</sup> International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Hiroshima, Japonia.
100. Larsson, L., Patel, V. C., Dyne, G., 1991, "Ship viscous flow: Proceedings of 1990 SSPA—CTH—IIHR Workshop", FLOWTECH Research Report No. 2.
101. Larsson, L., Regnström, B., Broberg, L., Li, D. Q., Janson, C. E., 1998, "Failures, fantasies, and feats in the theoretical/numerical prediction of ship performance", 22<sup>nd</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics, Washington, SUA.
102. Larsson, L., Stern, F., Bertram, V., 2003, "Benchmarking of computational fluid dynamics for ship flows: The Gothenburg 2000 Workshop", Journal of Ship Research, Vol. 47, No. 1, pp. 63–81.
103. Launder, B. E., Reece, G. J., Rodi, W., 1975, "Progress in the development of a Reynolds—Stress turbulent closure", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 68, pp. 537–566.
104. Launder, B. E., Spalding, D. B., 1972, "Mathematical models of turbulence", Academic Press, Londra, Anglia.
105. Lee, S. J., Kim, W. J., Van, S. H., 2003, "Wind tunel tests on flow characteristics of the KRISO 3600 TEU containership and 300k VLCC double—deck ship models", Journal of Ship Research, Vol. 47, No. 1, pp. 24–38.
106. Leonard, B. P., 1995, "Comments on the policy statement on numerical accuracy", ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 117, No. 1, pp. 5–6.
107. Lerbs, H. W., 1952, "Moderately loaded propellers with a finite number of blades and an arbitrary distribution of circulatın", Transactions of The Society of Naval Architects & Marine Engineers
108. Lomax, H., Pulliam, T. H., 1999, "Fundamentals of Computational Fluid Dynamics", Springer—Verlag.
109. Lübke, L. O., 2005, "Numerical simulation of the flow around the propelled KCS", CFD Workshop Tokyo 2005, Tokyo, Japonia.
110. Lübke, L. O., Mach, K. P., 2004, "LDV measurements in the wake of the propelled KCS model and its use to validate CFD calculation", 25<sup>th</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics, St. Jhon's, Canada.
111. Lungu, A., 2000, "Modelări numerice în hidrodinamică. Grile de discretizare", Editura Tehnică, București, România.
112. Lungu, A., Păcuraru, F., 2009, "Numerical study of the hull—propeller—rudder interaction", AIP Conference Proceedings, Vol. 1168, pp. 693–696.
113. Lungu, A., Păcuraru, F., 2010, "Free-Surface Flow around an Appended Hull", Proceedings of the 25<sup>th</sup> IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, pp. 246–252.
114. MAN Diesel & Turbo, 1996, "Basic principles of ship propulsion".
115. **Marcu, O.**, Lungu, A., 2009, "Numerical flow investigation around a ship model with propeller and rudder", The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati/ FASCICLE XI – SHIPBUILDING, p. 466–469.
116. **Marcu, O.**, Lungu, A., 2011, "The numerical study of propeller efficiency in non-uniform flow", International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics ICNAAM 2011. AIP Conference Proceedings, Vol. 1389, pp. 195–198.
117. **Marcu, O.**, Lungu, A., 2012, "Numerical investigation of the flow around the KVLCC2 hull in static drift motion", International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics ICNAAM 2012. AIP Conference Proceedings, Vol. 1479, pp. 185–188.
118. **Marcu, O.**, Lungu, A., Pacuraru, F., 2010, "Effects of the incidence rudder angle on the flow around single propeller ship model", The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati/ FASCICLE XI – SHIPBUILDING, pp. 47–54.

119. **Marcu, O.**, Obreja, D. C., 2011, “*Model tests on the KRISO hull for the powering performance assessment*”, The Annals of “Dunarea de Jos” University of Galati/ FASCICLE XI – SHIPBUILDING, pp. 17–22.
120. **Marcu, O.**, Obreja, D. C., 2012, “*RANS simulation of the planar motion mechanism tests for a VLCC hull*”, International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics ICNAAM 2012. AIP Conference Proceedings, Vol. 1479, pp. 189–192.
121. MARNET CFD, 2002, “*Best practice guidelines for marine applications of Computational Fluid Dynamics*”
122. Martinussen, K., Ringen, E., 2008, “*Simulation of KVLCC1 and KVLCC2 manoeuvring motion*”, SIMMAN 2008, Copenhagen, Danemarca.
123. Masuko, A., Ogiwara, S., 1989, “*Numerical simulation of viscous flow around practical hull forms*”, 5<sup>th</sup> International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Hiroshima, Japonia.
124. Masuko, A., Shirose, Y., Ando, Y., Kawai, M., 1987, “*Numerical simulation of viscous flow around series of mathematical ship models*”, *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 1987, No. 162, pp. 1–10.
125. Masuko, A., Shirose, Y., Ishida S., 1988, “*Numerical simulations of the viscous flow around ships including bilge vortices*”, 17<sup>th</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics”, Haga, Olanda.
126. Mei, Z., Roberts, A. J., 1995, “*Equations for turbulent flood waves*”, IUTAM/ISIMM Symposium on Structure and Dynamics of Nonlinear Waves in Fluids, Hanovra, Germania.
127. Menter, F. R., 1994, “*Two-equation Eddy-Viscosity turbulence models for engineering applications*”, AIAA Journal, Vol. 32, No. 8, pp. 1598–1605.
128. Menter, F. R., 1997, “*Eddy Viscosity transport equations and their relation to the  $k - \epsilon$  model*”, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 119, pp. 876–884.
129. Michel, R., Quémard, C., Cousteix, J., 1972, “*Méthode pratique de prévision des couches limites turbulentes bi- et tri-dimensionnelles*”, *La Recherche Aérospatiale*, No. 1, pp. 1–14.
130. Michell, J. H., 1898, “*The wave resistance of a ship*”, *Philosophical Magazine*, Vol. 45, Ser. 5, pp. 106–123.
131. Molland, A. F., Turnock, S. R., 2007, “*Marine rudders and control surfaces*”, Butterworth Heinemann, Oxford, Anglia.
132. Muscari, R., Di Mascio, A., 2011, “*Numerical simulation of the flow past a rotating propeller behind a hull*”, 2<sup>nd</sup> International Symposium on Marine Propulsors, Hamburg, Germania.
133. Myring, D. F., 1970, “*An integral prediction method for three-dimensional boundary layers in incompressible flow*”, R.A.E. Technical Report 70147.
134. Nash, J. F., Patel, V. C., 1971, “*A generalized method for the calculation of three-dimensional turbulent boundary layers*”, Proceedings of Project SQUID Workshop, Georgia Institute of Technology, SUA.
135. Ni, S. Y., 1987, “*Higher order panel methods for potential flows with linear or non-linear free surface boundary conditions*”, PhD Thesis, Editura Chalmers University of Technology, Gothenburg, Suedia.
136. Nonaka, K., Miyazaki, H., Nimura, T., Ueno, M., Hino, T., Kodama, Y., 2000, “*Calculation of hydrodynamic forces acting on a ship in maneuvering motion*”, MARSIM 2000, Orlando, Florida, USA.
137. Oberkampf, W. L., Trucano, T. G., Hirsch, C., 2003, “*Verification, validation, and predictive capability in computational engineering and physics*”, Sandia Report No. SAND2003–3769.
138. Obreja, D. C., 2005, “*Teoria navei. Concepte și metode de analiză a performanțelor de navigație*”, Editura Didactică și Pedagogică, București, România.
139. Obreja, D. C., Crudu, L., Păcuraru, S., 2008, “*Manevrabilitatea navei*”, Galați University Press, Galați, România.
140. Obreja, D. C., **Marcu, O.**, 2011a, “*KCS. Raportul testelor de elice în apă liberă*”, Grant CNCSIS ID 790 / 2011.
141. Obreja, D. C., **Marcu, O.**, 2011b, “*KCS. Raportul testelor de rezistență la înaintare*”, Grant CNCSIS ID 790 / 2011.
142. Obreja, D. C., **Marcu, O.**, 2011c, “*KCS. Raportul testelor de propulsie*”, Grant CNCSIS ID 790 / 2011.

143. Okuno, T., 1976, “*Distribution of wall shear stress and cross flow in three-dimensional turbulent boundary layer on ship hull*”, *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 1976, No. 139, pp. 10–23.
144. Pacuraru, F., Lungu, A., **Marcu, O.**, 2009, “*Numerical flow simulation around an appended ship hull*”, 12<sup>th</sup> NuTTS Numerical Towing Tank Symposium, Cortona, Italia.
145. Pacuraru, F., Lungu, A., **Marcu, O.**, 2011, “*Self-propulsion simulation of a tanker hull*”, International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics ICNAAM 2011. AIP Conference Proceedings, Vol. 1389, pp. 191–194.
146. Pacuraru, F., Lungu, A., Ungureanu, C., **Marcu, O.**, 2010, “*Numerical Simulation of the Flow around a Steerable Propulsion Unit*”, Proceedings of the 25<sup>th</sup> IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, pp. 246–252.
147. Patankar, S. V., Spalding, D. B., 1972, “*A calculation procedure for the heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows*”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 15, pp. 1787–1805.
148. Pattenden, R. J., Turnock, S. R., Pashias, C., 2005, “*Oblique ship flow predictions using identification of vortex centres to control mesh adaptation*”, CFD Workshop Tokyo 2005, Tokyo, Japonia.
149. Phillips, A. B., Turnock, S. R., Furlong, M., 2009 a, “*Evaluation of manoeuvring coefficients of a self-propelled ship using a blade element momentum propeller model coupled to a Reynolds averaged Navier Stokes flow solver*”, *Ocean Engineering*, Vol. 36, pp. 1217–1225.
150. Phillips, A. B., Furlong, M. E., Turnock, S. R., 2009 b, “*Accurate capture of rudder-propeller interaction using a coupled blade element momentum-RANS approach*”, 12<sup>th</sup> Numerical Towing Tank Symposium, Cortona, Italia.
151. Pope, S. B., 1975, “*A more general effective viscosity hypothesis*”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 72, pp. 331–340.
152. Prandtl, L., 1925, “*Bericht über Untersuchungen zur ausgebildeten Turbulenz*”, *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, Vol. 5, pp.136–139.
153. Prandtl, L., 1918, “*Tragflugeitheorie*”, *Gottinger Nachrichten, mathematisch– physikalische Klasse*, pp. 451–477.
154. Prandtl, L., 1919, “*Tragflugeitheorie*”, *Gottinger Nachrichten, mathematisch– physikalische Klasse*, pp. 107–137.
155. Rankine, W. J. M., 1865, “*On the mechanical principles of the action of propellers*”, *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects*, Vol. 6, pp. 13–39.
156. Raven, H. C., 1996, “*A solution method for the nonlinear ship wave resistance problem*”, PhD Thesis, Editura Technical University of Delft, Delft, Olanda.
157. Rawson, K. J., Tupper, E. C., 2001, “*Basic Ship Theory*”, Vol. 1, Butterworth Heinemann, Oxford, Anglia.
158. Rawson, K. J., Tupper, E. C., 2002, “*Basic ship theory*”, Vol. 2, Butterworth Heinemann, Oxford, Anglia.
159. Regnström, B., Broberg, L., Larsson, L., 2001, “*Ship stern flow calculations on overlapping composite grids*”, 23<sup>rd</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics, Val de Reuil, Franța.
160. Rhee, S. H., Skinner, C., 2005, “*Unstructured grid based Navier–Stokes solver for free-surface flow around surface ships*”, CFD Workshop Tokyo 2005, Tokyo, Japonia.
161. Richardson, L. F., 1910, “*The approximate arithmetical solution by finite differences of physical problems involving differential equations, with an application to the stresses in a masonry dam*”, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, Vol. 83, No. 563, pp. 335–336.
162. Richardson, L. F., Gaunt, J. A., 1927, “*The deferred approach to the limit*”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, Vol. 226, pp. 299–361.
163. Roache, P. J., 1990, “*Need for control of numerical accuracy*”, *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 27, No. 2, pp.98–102.
164. Roache, P. J., 1994, “*A method for uniform reporting of grid refinement studies*”, *FED–ASME*, Vol. 158.



165. Roache, P. J., 1997, “*Quantification of the uncertainty in Computational Fluid Dynamics*”, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 29, pp. 123–160.
166. Roache, P. J., 1998, “*Verification and validation in computational science and engineering*”, Hermosa Publishers, New Mexico, SUA.
167. Roache, P. J., Ghia, K., White, F., 1986, “*Editorial policy statement on the control of numerical accuracy*”, ASME Journal of Fluids Engineering.
168. Sakamoto, N., 2009. “*URANS and DES simulations of static and dynamic maneuvering for surface combatant*”, PhD Thesis, The University of Iowa, Iowa, SUA.
169. Sato, Y., Kobayashi, H., Hino, T., 2005, “*Ship flow computations by unstructured Navier–Stokes solver SURF*”, CFD Workshop Tokyo 2005, Tokyo, Japonia.
170. Schetz, J. A., Favin, S., 1977, “*Numerical solution for the near wake of a body with propeller*”, Journal of Hydronautics, Vol. 11, No. 4, pp. 136–141.
171. Shaw, C. T., 2002, “*Using Computational Fluid Dynamics*”, Prentice Hall, Hertfordshire, Anglia.
172. Shyy, W., Sindir, M., 1994, “*Comments on policy statement on the control of numerical accuracy*”, ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 116, No. 2, pp. 196–197.
173. Simonsen, C.D., 2000, “*Rudder, propeller and hull interaction by RANS*”, PhD Thesis, Editura Technical University of Denmark, Danemarca.
174. Simonsen, C.D., Stern, F., 2003, “*Verification and validation of RANS maneuvering simulation of Esso Osaka: effects of drift and rudder angle on forces and moments*”, Computers and Fluids, Vol. 32, pp. 1325–1356.
175. Simonsen, C.D., Stern, F., 2005 a, “*Flow pattern around an appended tanker hull form in simple maneuvering conditions*”, Computers and Fluids, Vol. 34, pp. 169–198.
176. Simonsen, C.D., Stern, F., 2005 b, “*RANS manoeuvring simulation of Esso Osaka with rudder and a body–force propeller*”, Journal of Ship Research, Vol. 49, No. 2, pp. 98–120.
177. Simonsen, C.D., Stern, F., 2008, “*Flow structure around manoeuvring tanker in deep and shallow water*”, 26<sup>th</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics, Roma, Italia.
178. Simonsen, C.D., Stern, F., Agdrup, K., 2006, “*CFD with PMM test validation for manoeuvring VLCC2 tanker in deep and shallow water*”, MARSIM 2006, Terschelling, Olanda.
179. Smith, A. M. O., Cebeci, T., 1967, “*Numerical solution of the turbulent boundary layer equations*”, Douglas Aircraft Division Report DAC 33735.
180. Sotiropoulos, F., Patel, V. C., 1994, “*Second moment modelling for ship–stern and wake flows*”, CFD Workshop for Improvement of Hull Form Designs, Tokyo, Japonia.
181. Sotiropoulos, F., Patel, V. C., 1995, “*Application of Reynolds stress transport models to stern and wake flows*”, Journal of Ship Research, Vol. 39, No. 4, pp. 263–283.
182. Spalart, P. R., Allmaras, S. R., 1992, “*A one–equation turbulence model for aerodynamic flows*”, AIAA Paper 92–0439.
183. Spalart, P. R., Allmaras, S. R., 1994, “*A one–equation turbulence model for aerodynamic flows*”, La Recherche Aerospaciale, No. 1, pp. 5–21.
184. Spalding, D. B., 1975, Imperial College of Science and Technology, Department of Mechanical Engineering Report HTS/75/5.
185. Speziale, C. G., Sarkar, S., Gatski, T. B., 1991, “*Modelling the pressure strain correlation of turbulence: an invariant dynamical system approach*”, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 227, pp. 245–272.
186. Stern, F., Agdrup, K., Kim, S. Y., Cura–Hochbaum, A., Rhee, K. P., Quadvlieg, F., Perdon, P., Hino, T., Broglia, R., Gorski, J., 2009, “*Lessons learnt from the workshop on verification and validation of ship manoeuvring simulations methods–SIMMAN 2008*”, MARSIM, Panama City, Panama.
187. Stern, F., Agdrup, K., Kim, S. Y., Cura–Hochbaum, A., Rhee, K. P., Quadvlieg, F., Perdon, P., Hino, T., Broglia, R., Gorski J., 2011, “*Experience from SIMMAN 2008–The first workshop on verification and validation of ship maneuvering simulations methods*”, Journal of Ship Research, Vol. 55, No. 2, pp. 135–147.

188. Stern, F., Bhushan, S., Carrica, P., Yang, J., 2009, “*Large scale parallel computing and scalability study for surface combatant static maneuver and straight ahead conditions using CFDShip-Iowa*”, 21<sup>st</sup> International Conference on Parallel Computing Fluid Dynamics, CA, SUA.
189. Stern, F., Kim, H. T., Zhang, D. H., Toda, Y., Kerwin, J. E., Jessup, S., 1994, “*Computation of viscous flow around propeller-body configurations: Series 60, CB=0.6 ship model*”, Journal of Ship Research, Vol. 38, No. 2, pp. 135–157.
190. Stern, F., Toda, Y., Kim, H. T., 1991, “*Computation of viscous flow around propeller-body configurations: Iowa Axisymmetric Body*”, Journal of Ship Research, Vol. 35, No. 2, pp. 151–161.
191. Stern, F., Wilson, R. V., Coleman, H., Paterson, E., 2001 a, “*Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations–Part 1: Methodology and procedures*”, ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 123, No. 4, pp.793–802.
192. Stern, F., Wilson, R. V., Coleman, H., Paterson, E., 2001 b, “*Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations–Part 2: Application for RANS simulation of a cargo/container ship*”, ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 123, No. 4, pp.803–810.
193. Stern, F., Wilson, R.V., Coleman, H., and Paterson, E., 1999, “*Verification and Validation of CFD Simulations,*” IIHR Report No. 407, Iowa Institute of Hydraulic Research/The University of Iowa, SUA.
194. Stern, F., Xing, T., 2008, “*Introduction to CFD*”.
195. Stern, F., Xing, T., Shao, J., Ghosh, S., 2005, “*Introduction to fluid mechanics*”.
196. Strøm-Tejsen, J., Chislett, M. S., 1966, “*A model testing technique and method of analysis for the prediction of steering and manoeuvring qualities of surface vessels*”, Report No. Hy-7 HyA, Lyngby, Danemarca.
197. Suzuki, H., Toda, Y., Suzuki, T., 1994, “*Computation of viscous flow around a rudder behind a propeller: laminar flow around a flat plate rudder in propeller slipstream*”, 6<sup>th</sup> International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, IOWA, SUA.
198. Svennberg, S.U., Regnström, B., Larsson, L., 1998, “*A test of turbulence models for vortices*”, 3<sup>rd</sup> Osaka Colloquium on Advanced CFD Applications to Ship Flow and Hull Form Design, Osaka, Japonia.
199. Tahara, Y., Ando, J., 2000, “*Comparison of CFD and EFD for KCS container ship in without/with-propeller conditions*”, Gothenburg 2000–A Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics, Gothenburg, Suedia.
200. Tahara, Y., Longo, L., Stern, F., Himeno, Y., 2002, “*Comparison of CFD and EFD for Series 60  $C_B=0.6$  in steady drift motion*”, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 7, No. 1, pp. 17–30.
201. Tahara, Y., Wilson, R., Carrica, P., 2005, “*Comparison of free-surface capturing and tracking approaches in application to modern container ship and prognosis for extension to self-propulsion simulator*”, CFD Workshop Tokyo 2005, Tokyo, Japonia.
202. Tanaka, I., Himeno, Y., 1975, “*First order approximation to three-dimensional boundary layer and its application to model-ship correlation*”, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 1975, No. 138, pp. 63–73.
203. Taylor, D. W., 1893, “*Resistance of ships and screw propulsion*”, Macmillan and Co., New York, SUA.
204. Taylor, G. I., 1932, “*The transport of vorticity and heat through fluids in turbulent motion*”, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, Vol. 135, No. 828, pp. 685–702.
205. Theodorsen, T., 1954, “*Theory of propellers*”, Shipsmodelltankens meddelelse, No. 33.
206. Thompson, J. F., Warsi, Z. U. A., Wayne Mastin, C., 1985, “*Numerical Grid Generation*”, Elsevier.
207. Toxopeus, S. L., 2007, “*Deriving mathematical manoeuvring models for bare ship hulls using viscous flow calculations*”, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 14, No. 1, pp. 30–38.

208. Toxopeus, S. L., 2011 a, “*Practical application of viscous-flow calculations for the simulation of manoeuvring ships*”, PhD Thesis, Editura Technical University of Delft, Delft, Olanda.
209. Toxopeus, S. L., 2011 b, “*Using CFD calculations to improve predictions of ship manoeuvres*”, RINA Developments in MARINE CFD, Londra, Anglia.
210. Toxopeus, S. L., Vaz, G., 2009, “*Calculation of current or manoeuvring forces using a viscous-flow solver*”, ASME 28<sup>th</sup> International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Honolulu, Hawaii.
211. Toxopeus, S.L., 2004, “*Validation of calculations of the viscous flow around a ship in oblique motion*”, The First MARIN–NMRI Workshop, Tokyo, Japonia.
212. Toxopeus, S.L., 2005, “*Verification and validation of calculations of the viscous flow around KVLCC2M in oblique motion*”, 5<sup>th</sup> Osaka Colloquium on Advanced Research on Ship Viscous Flow and Hull Form Design by EFD and CFD Approaches, Osaka, Japonia.
213. Turnock, S. R., Phillips, A. B., Furlong, M., 2008, “*URANS simulations of static drift and dynamic manoeuvres of the KVLCC2 tanker*”, SIMMAN 2008, Copenhaga, Danemarca.
214. Ueno, M., Yoshimura, Y., Tsukada, Y., Miyazaki, H., 2009, “*Circular motion tests and uncertainty analysis for ship maneuverability*”, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 14, No. 4, pp. 469–484.
215. van Driest, E. R., 1956, “*On turbulent flow near a wall*”, Journal of the Aeronautical Sciences, Vol. 23, No. 11, pp. 1007–1011.
216. van Mannen, J. D., van Oosannen, P., 1988, “*Principles of naval architecture*”, SNAME.
217. Van, S. H., Kim, J. W., Yoon, H. S., Lee, Y. Y., Park, I. R., 2006, “*Flow measurement around a model ship with propeller and rudder*”, Experiments in Fluids, Vol. 40, Issue 4, pp. 533–545.
218. Vanka, P., 1994, “*Response: To the comments by Drs. W. Shyy and M. Sindir*”, ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 116, No. 2, pp. 198–199.
219. von Kerczek, C. H., 1973, “*Calculation of the turbulent boundary layer on a ship hull at zero Froude number*”, Journal of Ship Research, Vol. 17, No. 2, pp. 106–120.
220. Wang, H. M., Tian, X. M., Zou, Z. J., Wu, B. S., 2008, “*Experimental and numerical researches on the viscous hydrodynamic forces acting on a KVLCC2 model in oblique motion*”, SIMMAN 2008, Copenhaga, Danemarca.
221. Wang, H., Zou, Z., Tian, X., 2009, “*Computation of the viscous hydrodynamic forces on a KVLCC2 model moving obliquely in shallow water*”, Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), Vol. 14, No. 2, pp. 241–244.
222. White, F. M., Lessmann, R. C., Christoph, G. H., 1975, “*A three-dimensional integral method for calculating incompressible turbulent skin friction*”, ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 97, Issue 4, pp. 550–555.
223. Wilcox, D. C., 1994, “*Turbulence modeling for CFD*”, DCW Industries, California, SUA.
224. Wilson, R., Stern, F., Coleman, H., Paterson, E., 2001, “*Comprehensive Approach to Verification and Validation of CFD Simulations-Part2: Application for RANS Simulation of A Cargo/Container Ship*”, ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 123, No. 4, pp.803–810.
225. Xia, F., 1986, “*Numerical calculations of ship flows with special emphasis on the free surface potential flow*”, PhD Thesis, Editura CHALMERS University of Technology, Gothenburg, Suedia.
226. Xing, T., Shao, J., Stern, F., 2007, “*BKW–RS–DES of unsteady vortical flow for KVLCC2 at large drift angles*”, 9<sup>th</sup> International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Michigan, SUA.
227. Yoshimura, Y., Ueno, M., Tsukada, Y., 2008, “*Effects of rudder and propeller on hull force derivatives with KVLCC1 and KVLCC2*”, SIMMAN 2008, Copenhaga, Danemarca.
228. Zhang Z. R., Liu H., Zhu S. P., Zhao F., 2006, “*Application of CFD in ship engineering design practice and ship hydrodynamics*”, Conference of Global Chinese Scholars on Hydrodynamics, Shanghai, China.

229. Zhang, D. H., Broberg, L., Larsson, L., Dyne, G., 1991, "A method for computing stern flows with an operating propeller", Transactions of the Royal Institution of Naval Architects, Vol. 134, pp. 245–259.
230. Zou, L., Larsson, L., Orych, M., 2010, "Verification and validation of CFD predictions for a manoeuvring tanker", 9<sup>th</sup> International Conference on Hydrodynamics, Shanghai, China.
- \*\*\* 1941, "Theodore von Kármán, anniversary Volume", California Institute of Technology, SUA.
- \*\*\* 1978, 15<sup>th</sup> ITTC Proceedings.
- \*\*\* 1981, 16<sup>th</sup> ITTC Proceedings.
- \*\*\* 1984, 17<sup>th</sup> ITTC Proceedings.
- \*\*\* 1987, 18<sup>th</sup> ITTC Proceedings.
- \*\*\* 1990, 19<sup>th</sup> ITTC Proceedings.
- \*\*\* 1993, 20<sup>th</sup> ITTC Proceedings.
- \*\*\* 1996, 21<sup>st</sup> ITTC Proceedings.
- \*\*\* 1999, 22<sup>nd</sup> ITTC Proceedings.
- \*\*\* 2002, 23<sup>rd</sup> ITTC Proceedings.
- \*\*\* 2005, 24<sup>th</sup> ITTC Proceedings.
- \*\*\* 2008, 25<sup>th</sup> ITTC Proceedings.
- \*\*\* 2011, 26<sup>th</sup> ITTC Proceedings.
- \*\*\* 1990, "SSPA–CTH–IIHR Workshop on Ship Viscous Flow", Gothenburg, Suedia.
- \*\*\* 1994, "CFD Workshop Tokyo 1994", Tokyo, Japonia.
- \*\*\* 2000, Gothenburg 2000–A Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics.
- \*\*\* 2005, "CFD Workshop Tokyo 2005", Tokyo, Japonia.
- \*\*\* 2008, SIMMAN 2008–Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods.
- \*\*\* 2010, Gothenburg 2010–A Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics.
- \*\*\* [http://ro.wikipedia.org/wiki/Mecanica\\_fluidelor\\_numerică](http://ro.wikipedia.org/wiki/Mecanica_fluidelor_numerică)