

UNIVERSITATEA MARITIMĂ DIN CONSTANȚA  
FACULTATEA DE ELECTROMECHANICĂ NAVALĂ  
ȘCOALA DOCTORALĂ INGINERIE MECANICĂ ȘI  
MECATRONICĂ



**TEZĂ DE DOCTORAT**  
**-Rezumat-**

***CONTRIBUȚII LA STUDIUL  
DINAMICII UNUI SISTEM DE  
PROPULSIE NAVALĂ  
NECONVENTIONALĂ***

**Doctorand: Ing. Cristian-Milică Niță**

**Conducător științific:  
Prof. univ. dr. ing. Bocănete Paul**

**Constanța  
2022**

## **CUPRINS**

### **INTRODUCERE**

### **STRUCTURA ȘI CARACTERUL MULTIDISCIPLINAR AL TEZEI**

### **CAPITOLUL I**

### **STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRII SISTEMELOR NECONVENȚIONALE DE PROPULSIE A NAVELOR**

- 1.1 Introducere
- 1.2 Scurt istoric al construcțiilor navale
- 1.3 Instalații de propulsie navale – considerații generale
- 1.4 Elemente de teoria propulsorului ideal
- 1.5 Elemente de teoria propulsorului
- 1.6 Stadiul actual și impactul utilizării energiilor neconvenționale în contextul energetic internațional

### **CAPITOLUL II**

### **STUDIUL EFICIENȚEI ENERGETICE AL PROPULSOARELOR NAVALE NECONVENȚIONALE**

- 2.1 Eficiența energetică a sistemelor de propulsie convenționale și a combustibililor acestora
- 2.2 Eficiența energetică a sistemelor de propulsie neconvenționale
- 2.3 Surse regenerabile de energie

### **CAPITOLUL III**

### **METODE DE MODELARE NUMERICĂ A PROPULSOARELOR NECONVENȚIONALE**

- 3.1 Caracterizarea software-ului Ansys TM Fluent
- 3.2 Rezultate ale simulărilor Ansys TM Fluent

- 3.3 Model UDF pentru modelarea acțiunii propulsorului
- 3.4 Exemplu de cod UDF
- 3.5 Determinarea deplasării palei de propulsie tip „Dolphin tail”
- 3.6 Modelare pală triunghiulară pentru propulsie neconvențională
- 3.7 Date de intrare în simulare CFD

#### **CAPITOLUL IV**

#### **METODE EXPERIMENTALE DE DETERMINARE A MĂRIMILOR CARACTERISTICE A PROPULSOARELOR NAVALE NECONVENȚIONALE**

- 4.1 Organizarea măsurătorilor pentru determinarea mărimilor caracteristice a propulsoarelor navale neconvenționale
- 4.2 Descrierea standului de test
- 4.3 Modul de măsurare a mărimilor caracteristice a propulsoarelor navale neconvenționale
- 4.4 Rezultate de măsurare a mărimilor caracteristice a propulsoarelor navale neconvenționale

#### **CAPITOLUL V**

#### **ANALIZA ȘI OPTIMIZAREA SISTEMULUI DE PROPULSIE “TIP COADĂ” SAU “DOLPHIN TAIL”**

- 5.1 Analiza rezultatelor obținute pentru validarea modelului
- 5.2 Prezentarea rezultatelor simulării și măsurătorilor suprapuse
- 5.3 Interpretarea rezultatelor obținute prin simularea numerică cu CFD ANSYS Fluent și prin testările reale
- 5.4 Optimizarea performanțelor sistemului de propulsie “tip coadă” sau “dolphin tail”

## **CAPITOLUL VI**

### **CONCLUZII**

## **CAPITOLUL VII**

### **CONTRIBUȚII PERSONALE. DIRECȚII DE CERCETARE VIITOARE**

- 7.1 Simularea acțiunii sistemelor de propulsie neconvenționale în mare agitată
- 7.2 Continuarea experimentărilor pe modelul existent
- 7.3 Studierea altor modele matematice și a altor unelte software pentru estimarea numerică a acestor probleme

### **LISTA PRINCIPALELOR ABREVIERI**

### **LISTA PRINCIPALELOR UNITĂȚI DE MĂSURĂ**

### **RAPORT GENERIC ANSYS**

### **BIBLIOGRAFIE**

### **ANEXA 1**

## INTRODUCERE

Domeniul propulsiei navale este într-o continuă dezvoltare și reprezintă o continuă și intensă cercetare pentru aplicarea celor mai noi tehnologii.

De la mijlocul anilor 1970, a început să se înțeleagă matematica complexă necesară generalizării algoritmilor, iar programele CFD cu scop general au fost dezvoltate. Acestea au început să apară la începutul anilor 1980 și au cerut calculatoare foarte puternice, precum și o cunoaștere aprofundată a mecanicii fluidelor și o cantitate mare de timp pentru a crea modelări. În consecință, programele CFD sunt instrumente utilizate pe scară largă, atât în cercetare, cât și în industrie, unde utilizarea lor poate scădea foarte mult timpul de dezvoltare al unui produs, sau poate prezice comportarea unor sisteme tehnice în condiții date.

Propulsia studiată în această lucrare este una dezvoltată de natură pe timpul a milioane de ani și care poate să fie studiată în cadrul Universității Maritime din Constanța cu cele mai noi programe software, dar și testată în laborator. Studiul sistemului de propulsie neconvențională cu aplicare navală studiat este bazat pe coada de delfin și folosește cele mai noi tehnici de simulare.

Lucrarea este dezvoltată în jurul a trei direcții de cercetare majore:

- Simularea cu ajutorul software ANSYS în mediul CFD.

- Validarea rezultatelor numerice ANSYS pe baza rezultatelor experimentale obținute în laborator.
- Analiza funcțiilor de împingere pentru identificarea efectului avut de sistemul de propulsie neconvențională.

Modulul Ansys TM-Fluent R1 anul 2022 permite rularea de simulări cu aceleași date, dar mai multe modele de studiu cu o mare ușurință. Cercetările numerice bazate pe software ANSYS au fost realizate în UMC. Simulările numerice au fost prelucrate la cel mai înalt nivel și am obținut calificarea necesară prin participarea la cursul destinat Ansys. Avantajul acestor calcule inițiale este că se pot rula un număr mare de simulări și configurații geometrice în Ansys Fluent.

Lucrarea conține toate elementele din teoria propulsorului clasic și indică modul în care se pot efectua cele mai noi modelări numerice pentru instalațiile de propulsie în relație cu teoria turbulentă și modelul SKE.

Prin funcția [Force\_x] vom calcula forța de împingere în kg. Această funcție are rolul de a integra presiunile ce apar pe pala cu formă triunghilară realizată în partea de DesignModeller pe suprafațele superioară și inferioară simultan. Rezultatele funcției [Force\_x] sunt prezentate în tabele și grafice.

Problemele de mediu generate de traficul naval, terestru, aerian cât și cel feroviar sunt legate de emisii de gaze și vibrații în mediul marin. Pentru reducerea vibrațiilor emise în mediul marin, sistemul de propulsie neconvențional se poate configura pentru propulsia ambarcațiunilor de mici dimensiuni, limitarea fiind dată de rezistența materialelor din care se confecționează acest propulsor. Eficiența energetică este prezentată pentru

diverse sisteme neconvenționale și potențialii combustibili de utilizat pentru ecologizarea transportului naval.

Capitolul 3 conține o caracterizare software-ului Ansys TM Fluent și a modului de lucru pentru analiza numerică a propulsiei navale neconvenționale. Schema modelului de calcul al programului FLUENT este prezentată în detaliu pentru o mai bună înțelegere a modului de calcul. Există diferite metode pentru soluționarea problemelor utilizate în codurile CFD, dar cea mai comună și cea pe care se bazează CFX este cunoscută ca metoda volumelor finite și este cea utilizată în această lucrare. Softul Fluent ce face parte din pachetul de programe ANSYS TM permite prin metoda UDF (user defined function) modificarea ecuațiilor de lucru ceea ce face ca răspunsurile și cerințele să se ridice la cel mai înalt nivel.

Soluțiile calculate sunt cu atât mai bune, cu cât se face o discretizare mai fină și cu cât se dau mai multe iterații de calcul. Rezultatele obținute au fost puse în evidență cu ultima parte a programului, în secțiunile de interes: intrare și ieșire, dar și în planuri de secțiune paralele cu axele de coordonate originale. La cele menționate mai sus utilizatorul poate adăuga în funcție de necesități condiții suplimentare la calcularea diferitelor valori ale accelerațiilor, vitezelor, presiunilor și turbulenței. Pentru obținerea figurilor prezente în lucrarea de față am folosit modelul SKE (Standard k-epsilon) și coeficienții standard definiți de program. SKE este răspândit în calculul și proiectarea aplicațiilor industriale, dar este loc de modificări și îmbunătățiri cu ajutorul funcțiilor UDF pentru toate modelele prezentate.

Determinarea deplasării palei de propulsie tip „Dolphin tail” se realizează pe baza ipotezelor prezentate în capitolul de simulare pentru modelul 3D. Schema de

simulare a palei triunghiulare este prezentată și realizată grafic în simulare parametrică.

Cercetările în bazin implică realizarea practică a structurii la scară și analiza rezultatelor în funcție de modelele studiate și frecvența de lucru. Măsurătorile obținute sunt apropiate ca valoare de cele din simulările numerice, acest lucru confirmând rezultatele numerice obținute cu Ansys Fluent.

Analiza efectuată asupra propulsiei navale neconvenționale include toate elementele de calcul pentru a putea extinde înțelegerea acestui tip de propulsie pentru a putea găsi cele mai adecvate utilizări în domeniul naval și nu numai.

Cercetările efectuate în cadrul acestei teze prezintă numeroase elemente de analiză a sistemului de propulsie navală neconvențională. Prin trasarea și validarea funcțiilor de împingere pentru o pală se realizează o analiză completă a modului în care lucrează această propulsie.



## **STRUCTURA ȘI CARACTERUL MULTIDISCIPLINAR A TEZEI**

Prin aspectele prezentate în teza cu titlul „**CONTRIBUȚII LA STUDIUL DINAMICII UNUI SISTEM DE PROPULSIE NAVALĂ NECONVENȚIONALĂ**” se facilitează înțelegerea sistemelor de propulsie tip „Dolphin Tail”. Cercetările prezente au un caracter multidisciplinar și pot contribui la dezvoltarea viitoarelor proiecte cu aplicare în domeniul propulsiei ambarcațiunilor. Aspecte importante ce se pot aplica și altor probleme ingierești.

Măsurătorile s-au desfășurat în laboratoarele Universității Maritime din Constanța. Pentru măsurători am folosit bazinul de încercări și am folosit mecanisme de prindere și senzori descriși în lucrare.

Obiectivele principale ale activității de validare pe modelele realizate au fost:

- Măsurarea forțelor de împingere create pentru diferite frecvențe de lucru.
- Calcularea amplitudinilor de lucru pentru modelele de test.
- Compararea rezultatelor obținute prin simularea numerică cu CFD ANSYS Fluent, cu cele obținute la testările reale.
- Alegerea modelului optim constructiv dintre modelele studiate și explicarea selecției.
- Determinarea presiunilor și dinamicii din jurul palei propulsorului de tip “Dolphin tail”.

Toate modelele utilizate au fost stocate într-o bază de date. Modelul Ansys va putea fi folosit mai târziu

Contribuții la studiul dinamicii unui sist. de propulsie navală neconvențională

pentru orice altă dimensiune și formă a propulsiei neconvenționale studiate.

Utilizarea simulărilor Ansys a stat la bază pentru crearea și realizarea modelului de test și pentru stabilirea dimensiunilor palelor triunghiulare de tip Dolphin Tail. Simulările s-au efectuat pe parcursul mai multor sesiuni pentru a rula fiecare model testat ulterior fizic.

Simularea generală fost materializată prin utilizarea softurilor ce țin de CFD (programul ANSYS) și măsurarea în bazinul modificat de testare s-a făcut în laboratoarele Universității Maritime din Constanța.

Postprocesarea este componenta CFD utilizată pentru a analiza, a vizualiza și a prezenta rezultatele interactiv. Postprocesarea include orice, de la obținerea valorilor punctului la secvențe animate complexe.

Câteva exemple de caracteristici importante ale postprocesoarelor CFD sunt:

- Vizualizarea sistemului 3D și a volumelor implicate în analiză.

- Vizualizare grafică vectorială care arată direcția și amplitudinea fluxului.

- Vizualizarea variației variabilelor scalare (variabile care au numai magnitudine, nu direcție, cum ar fi temperatura, presiunea și viteza) în domeniul studiat.

- Calcule cantitative numerice.

- Ridicarea de diagrame în funcție de parametrii aleși.

- Posibilitate de generare de rapoarte pe format fizic (hârtie) și/sau electronic pentru mărimile caracteristice propulsorului neconvențional studiat.

Rezultatele prezentate pentru o pală triunghiulară au fost realizate cu ajutorul Ansys Fluent și prezintă un mod multidisciplinar și o aplicabilitate extinsă în inginerie.

# **CAPITOLUL I**

## **STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRII SISTEMELOR NECONVENTIONALE DE PROPULSIE A NAVELOR**

### **Primele tipuri de ambarcațiuni**

Datele documentare existente, stabilite cu aproximație înaintea anului 6000 î.e.n., arată că primele ambarcațiuni utilizate au fost niște canoe rudimentare obținute prin scobirea trunchilor de copaci. Acestea erau propulsate și guvernate la început cu ajutorul palmelor de la mâini, iar mai târziu cu ajutorul unor prăjini permițându-le oamenilor traversarea apelor nu prea adânci și, bineînțeles, nu prea late.

### **Navele moderne**

Rolul economic tot mai accentuat al petrolului a condus la o evoluție rapidă a navelor destinate transportului acestei importante categorii de materie primă și combustibil. Navele petroliere înregistrează cel mai spectaculos salt în privința tonajului: de la circa 300 t la sfârșitul secolului al XIX-lea la 45000 t în 1953 (petrolierul „Tona Onasis”), la 100000t în 1965 (petrolierul „British Admirai”), urmate apoi de replica japoneză din care se menționează doar câteva exemple – „Idemtru Mani” de 210000t în 1966, urmat în 1971 de „Nisseki Mani” de 372400t, apoi de alte petroliere de 500000t, 600000t, 850000t și 1000000t. În prezent a apărut tendința de reconsiderare a tonajului, de renunțare la ideea construirii unor astfel de petroliere gigant, din cauză mai multor dezavantaje pe care le prezintă acestea, revenindu-se la construcția de petroliere de dimensiuni și deplasamente

mai mici.

Un pas important în construcțiile navale îl constituie utilizarea energiei nucleare la propulsia navelor, fapt ce le sporește considerabil autonomia de marș.

Soluții constructive diferite de cele clasice apărute într-o etapă mai recentă sînt reprezentate de navele realizate pe principii dinamice de plutire, dintre care menționăm navele cu aripi portante și navele pe pernă de aer, construcții de dimensiuni relativ mici destinate îndeosebi transportului de pasageri, transporturilor rapide de mărfuri, serviciilor poștale și altor scopuri speciale. Aceste tipuri de nave realizează viteze mari prin faptul că pe timpul deplasării corpul se ridică deasupra apei fie datorită efectului aripilor portante, fie prin obținerea unei forțe de substație cu ajutorul unor jeturi de aer create și întreținute între suprafața apei și navă.

Există numeroase preocupări ale constructorilor navali de a perfecționa continuu sistemele constructive ale corpului, a sistemelor de propulsie și de guvernare, a utilajelor destinate manipulării mărfurilor, a aparaturii de comandă de la distanță și de automatizare, precum și pentru realizarea unor nave multifuncționale.

În privința echipamentului și dotărilor navelor moderne, chiar și într-o succintă prezentare a evoluției construcțiilor navale, se pot menționa perfecționările aduse aparaturii de navigație (girocompas, radar, pilot automat, dirijarea navigației prin intermediul sateliților), calculatoarelor de bord prevăzute pentru optimizarea calculelor de navigație, a funcționării instalațiilor de încărcare-descărcare, de propulsie, precum și aparaturii de automatizare a diferitelor comenzi, semnalizări etc. Toate aceste perfecționări și dotări moderne au făcut posibilă construcția unor nave din ce în ce mai eficiente și mai sigure în exploatare.

În perspectiva dezvoltării construcțiilor navale pe plan mondial sunt de așteptat perfecționări viitoare multiple, facilitate de progresul continuu al științei, tehnicii și tehnologiei, care va crea posibilități tot mai mari de adoptarea unor soluții mai economice pentru rezolvarea unor probleme cum sunt:

- propulsia navelor – prin extinderea utilizării propulsiei nucleare, a turbinelor cu gaze, a altor sisteme energetice și tipuri de propulsoare;
- micșorarea rezistenței la înaintare pentru navele clasice prin optimizarea formei carenei, în mod deosebit a formelor din prova și pupa, prin folosirea unor aditivi aplicați pe suprafața exterioară a corpului imers etc.;
- mărirea dimensiunilor și tonajului navelor moderne realizate pe principii dinamice de plutire – pe aripi portante și în mod deosebit a navelor pe pernă de aer, pe care mulți specialiști le consideră navele viitorului.

Actuala criză economică mondială și în mod deosebit criza energetică vor determina mutații calitative care vor conduce la continua dezvoltare și perfecționare a construcțiilor navale. Această direcție obiectivă este argumentată de faptul că navele constituie mijlocul de transport de bază și în același timp cel mai economic pentru comerțul internațional, iar pentru traficul intern de mărfuri transportul pe apă capătă o pondere din ce în ce mai mare.

### **Instalații de propulsie navale – considerații generale**

Propulsia navei, respectiv deplasarea acesteia pe drumul dorit cu viteza impusă, se realizează cu ajutorul instalației de propulsie.

Pentru ca o navă să poată înainta cu o anumită viteză, trebuie să i se aplice o forță, egală și de sens contrar

forței de rezistență a apei, ce ia naștere la înaintarea navei. Forța ce are ca efect înaintarea navei, poate fi creată prin intermediul diverselor surse de energie existente la bordul navelor. Energia vântului poate fi, de asemenea, transformată cu ajutorul velelor în lucru mecanic de înaintare a navei.

În accepțiunea lui M. Amorăriței, propulsoarele navale transformă energia mecanică produsă de mașinile principale de propulsie în energie cinetică a navei, mai precis într-o forță de împingere care antrenează nava în mișcare, forță a cărei mărime depinde de valoarea rezistenței la înaintare a navei la viteza dorită.

Propulsoarele utilizate depind de tipul și condițiile de exploatare ale navei.

După modul în care este realizată forța de împingere, propulsoarele navale se împart în două categorii: active și reactive.

Propulsoarele active dezvoltă forța de împingere prin acțiunea directă a vântului (vela, rotoarele Flettner), iar cele reactive produc forța de împingere prin reacția masei de apă care este obligată să se deplaseze în sens contrar mișcării navei (ramele, roata cu zbatouri, elicea navală, propulsorul cu aripioare, propulsorul cu jet).

Pentru propulsarea navelor se utilizează mașini cu abur (alternative sau turbine), motoare cu ardere internă (diesel sau turbine cu gaze), electromotoare alimentate cu grupuri electrogene sau acumulatori. Energia atomică este utilizată încă pe scară, mai ales pentru nave cu destinație specială. Nevoia de a utiliza energia eoliană, conduce actualmente la construcția de nave cu mașini și vele.

În cazul propulsoarelor reactive cu pale, reacțiunea apei respinse, este preluată direct prin palele ce sunt fixate pe un suport. Împingerea ce ia naștere ca urmare a acțiunii propulsorului, este transmisă corpului navei prin

intermediul arborelui portelice, a liniei de arbori și a lagărului de împingere.

❖ Roata cu zbatari este primul propulsor utilizat în era propulsiei mecanice, acționat mecanic de către o instalație de producere a energiei, amplasată la bordul navelor. Roțile cu zbatari sunt propulsoare care produc forța de împingere, datorită antrenării masei de apă, pe care plutește nava, de către zbatările cufundate ce se rotesc.

Din punct de vedere cinematic, roțile cu zbatari se împart în două tipuri principale:

- roți cu zbatari radiale fixe;
- roți cu zbatari radiale articulate (rotative).

Tipul cinematic al unei roți cu zbatari este determinat, de mărirea excentricității relative cu ajutorul relației:  $e_r = \frac{e}{k}$ , unde  $k$  este un factor de viteză.

❖ Cel mai răspândit tip de propulsor este elicea navală. Elicele sunt propulsoare reactive, ce au luat naștere ca urmare a schimbării, montării zbaturilor din poziție perpendiculară pe planul roții în poziție înclinată și ca urmare a dispunerii roții în pupa navei. Marginea palelor ce taie vâna de fluid se numește muchie de atac sau de intrare.

## CAPITOLUL II

### STUDIUL EFICIENȚEI ENERGETICE AL PROPULSOARELOR NAVALE NECONVENTIONALE

#### 2.1. Eficiența energetică a sistemelor de propulsie convenționale și a combustibililor acestora

##### Motoare diesel

Mașina propulsată diesel este astăzi principalul mijloc de propulsie marină. În linii mari, motoarele sunt clasificate în motoare: lente, în doi timpi; de viteză medie, în patru timpi; și de mare viteză, în patru timpi (figurile 2.1 și 2.2). În timp ce pentru unele nave, datorită design-ului și profilului operațional, sunt utilizate fie motoare diesel lente sau de viteză medie ca principal mod de propulsie, cele mai multe nave sunt echipate cu motoare diesel suplimentare de mare sau medie viteză pentru consumul energetic auxiliar. În plus, toate navele comerciale dețin mijloacele necesare pentru a genera energie electrică în caz de urgență, conform convenției SOLAS.



Fig. 2.1. Motor diesel lent (Wärtsilä RT-flex82T versiunea B, motor principal) [28]



Principala preocupare a constructorilor de motoare constă în metoda cea mai eficientă pentru construcția diverselor motoare. Recircularea gazelor de ardere este o metodă care poate fi utilizată în scopul reducerii  $\text{NO}_x$  la motoarele diesel lente și medii. În cazul motoarelor în doi timpi, motoare lente, au fost realizate programe de dezvoltare cu sisteme de recirculare a gazelor de ardere în ultimii 20 de ani. Printre acestea se numără studiile efectuate în exploatare la bordul navei *Alexander Maersk* care au adus contribuții utile pentru înțelegerea acestor sisteme. Cu metoda EGR de reducere a  $\text{NO}_x$  parte din oxigenul din aer captat este înlocuit cu  $\text{CO}_2$ , deoarece dioxidul de carbon are o capacitate calorică mai mare, ceea ce reduce temperaturile de vârf din interiorul cilindrilor. Studiile din timpul funcționării au arătat că componentele sistemului, cum ar fi segmentii pistonului, suflantele EGR, dispozitivul de colectare a vaporilor de apă și sistemele de control s-au comportat bine. Injecția apei în cilindri la momentul arderii și umidificarea aerului de admisie este, de asemenea, utilă în reducerea conținutului de  $\text{NO}_x$  din gazele de ardere la motoarele lente. Mai multe metode au fost proiectate și testate în acest scop de diverși producători de motoare lente și de viteză medie.

O altă abordare se referă la injectarea de amoniac în fluxul gazelor de ardere, de obicei sub forma unei soluții ureice. Aceasta reacționează cu componenta evacuată  $\text{NO}_x$  la suprafața elementelor de reducere catalitică selectivă pentru a forma  $\text{N}$  și  $\text{H}_2\text{O}$ . Această metodă necesită, totuși, un spațiu alocat pentru depozitarea ureei pe navă, sisteme de dozare și control, precum și elemente de reducere catalitică selectivă care pot înlocui amortizorul normal.

Proiectul „Green Ship of the Future” a întreprins un studiu pe un petrolier de 38.500 tdw propulsat de un

motor diesel lent care a fost planificat să petreacă 13,5% din timpul voiajului într-o zonă de control al emisiilor [14].

Au fost luate în considerare trei opțiuni: utilizarea unui combustibil cu conținut redus de sulf; plasarea unui epurator al gazelor de ardere în sistem sau folosind combustibil LNG. Opțiunea combustibilului cu conținut scăzut de sulf a implicat unele probleme de lubrifiere. Alternativa privind epurarea gazelor de evacuare, bazată pe utilizarea uleiului pentru combustibil greu, a necesitat instalarea unui nou coș de fum datorită introducerii scruberului împreună cu mecanismul său asociat și tancuri noi. În ultimul caz, utilizarea de combustibil LNG, au fost necesare conducte noi și un sistem de alimentare cu combustibil împreună cu noile tancuri LNG; de asemenea, în acest caz, au fost montate două rezervoare de 350 m<sup>3</sup> pe punte.

O nouă clasă de motoare cu cursă ultra-lungă a fost introdusă în piața de propulsie marină. Aceste motoare au o viteză mai mică și, în cazul în care este utilizat cu o elice cu diametrul optim, la aceste viteze scăzute ale rotațiilor, eficiența generală a propulsiei navelor poate fi îmbunătățită. Acest beneficiu hidrodinamic poate fi apoi coroborat cu caracteristicile consumului de combustibil îmbunătățite ale motorului. Tabelul 1.1 arată diferențele consumurilor de combustibil dintre un motor cu cursa ultra-lungă și un motor tradițional.

Tabelul 2.1. Comparație între un motor cu cursa ultra-lungă și un motor tradițional [12]

<b>Parametrii motorului</b>	<b>Motorul K 98 ME</b>	<b>Motorul S 90 ME</b>
Cursă piston (mm)	2660	3260
Viteză (rpm)	97	84

Consum specific de combustibil (g/kWh)	174	167
--	-----	-----

Pentru a reduce consumul de combustibil a existat o tendință de a rula motoarele marine mari la sarcină parțială. Deși astfel de restricții au fost mare parte limitate la puteri continue de peste 60% din valoarea nominală continuă maximă (MCR), mai recent, în operarea navelor containere, aceste limitări au fost reduse până la 10% MCR. Pentru a realiza aceste sarcini extrem de reduse, alimentarea cu ulei pentru lubrifiere trebuie să fie redusă odată cu introducerea metodelor de reglare a motorului pentru încărcare parțială și redusă.

O importanță în acest context o au bypass-ul gazelor de ardere, suprafața variabilă a turbinei, controlul injecției combustibilului în motor și reglarea presiunii înalte.

Potențialele avantaje și dezavantaje ale tehnologiei:

➤ Avantaje:

- i. Tehnologia motorului diesel este o formă bine înțeleasă și fiabilă de propulsie marină și de generare a energiei auxiliare.
- ii. Formarea de ingineri pentru operarea utilajelor diesel este bine cunoscută și există facilități pentru nivelurile de învățământ corespunzătoare.
- iii. Producătorii de motoare au bine stabilite rețelele pieselor de schimb și reparații în întreaga lume.
- iv. Motorina, în toate gradele sale, este ușor obținută prin rețeaua de distribuție la nivel mondial.
- v. Multe metode primare și secundare pentru reducerea emisiilor, care sunt percepute în prezent ca fiind dăunătoare, sunt disponibile. Mai mult decât atât, există un program continuu de

cercetare și dezvoltare întreprins de către constructorii de motoare în acest sens.

➤ Dezavantaje:

- i. Motoarele diesel produc emisii  $\text{CO}_2$ , precum și  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$  și compuși organici volatili. Prin urmare, acestea trebuie să fie conforme cu cerințele anexei VI MARPOL și incluse pe timpul evaluării EEDI navei.
- ii. Emisiile  $\text{SO}_x$  sunt în funcție de conținutul de sulf din combustibilul utilizat în motor și pentru respectarea reglementărilor este necesară utilizarea unei tehnologii de reducere a acestuia.
- iii. Posibilitatea contaminării combustibilului marin cu biocombustibili de primă generație trebuie gestionați cu grijă la bordul navelor.

## **CAPITOLUL III**

# **METODE DE MODELARE NUMERICĂ A PROPULSOARELOR NECONVENTIONALE**

### **3.1. Caracterizarea software-ului Ansys TM Fluent**

Ansys TM oferă o gamă completă de soluții de simulare și conține seturi inginerești care oferă acces la aproape orice domeniu de simulare inginerească, care necesită un proces de proiectare în prealabil. Ansys TM pentru oferă cea mai bună soluție în inginerie software de simulare. Compania Ansys TM a fost pionier în dezvoltarea și aplicarea unor metode de simulare pentru a rezolva probleme dificile de inginerie. Soluțiile software de la Ansys TM, combinate cu serviciile cu valoare adăugată și de sprijin, au fost catalizatori pentru inovație și timp mai rapid de rezolvare a diferitelor probleme pentru mii de echipele de ingineri din întreaga lume.

Ansys TM-Fluent este un program modern de calculator ce permite modelarea curgerilor fluidelor, a transferului de căldură și a reacțiilor chimice în jurul sau în diferite corpuri cu geometrii complexe.

Softul Ansys TM Fluent permite analiza curgerii fluidelor în jurul corpurilor și acțiunea acestuia asupra diferitelor suprafețe. Pentru diferite regiuni se pot plota graficele de variație ale presiunilor și vitezelor, fiind o sursă utilă în optimizarea curgerii fluidelor.



Fig. 3.1 Programul Ansys TM V 2022

Ansys TM-Fluent este scris în limbajul C și face utilizarea deplină a flexibilității și a puterii oferite de limbajul de programare. În consecință, alocarea dinamică a memoriei, structuri eficiente de date, control și rezolvarea flexibilă, toate sunt posibile. În plus, programul Ansys TM-Fluent folosește o arhitectură client/server, care îi permite să ruleze procese separate simultane pe stațiile de lucru desktop și servere client puternice de calcul. Această arhitectură permite execuția eficientă, control interactiv și flexibilitate completă între diferite tipuri de mașini sau sisteme de operare.

### **3.2. Rezultate ale simulărilor Ansys TM Fluent**

Pentru realizarea modelării forțelor de interacțiune fluid-structură am apelat la programul Ansys TM Fluent. Fluent este un program bazat pe metoda volumelor finite.

#### **Rezolvarea problemei CFD**

Sistemul de ecuații complex care rezolvă problema CFD se numește Solver. El produce rezultatele necesare într-un proces discontinuu dar non-interactiv. O problemă a CFD este rezolvată după cum urmează:

1. Ecuațiile diferențiale parțiale sunt rezolvate în toate volumele de control din regiunea de interes. Aceasta este echivalentă cu aplicarea unei legi de conservare de bază (de exemplu, pentru masă sau moment) pentru fiecare volum împărțit în timpul mesh-ului.

2. Acest sistem de ecuații integrale sunt convertite într-un sistem de ecuații algebrice prin generarea unui set de aproximări pentru termenii din ecuațiile integrale.

3. Ecuațiile algebrice sunt rezolvate iterativ.

O rezolvare iterativă este necesară din cauza tipului de ecuații neliniare și, pe măsură ce soluția se apropie de soluția exactă, se spune că se converge. Pentru fiecare iterație, o eroare sau un reziduu este raportată ca măsură a conservării globale a proprietăților de curgere.

Procesul de soluționare nu necesită interacțiune cu utilizatorul și, prin urmare, este, de obicei, efectuat ca un proces discontinuu.

Solver-ul produce un fișier cu rezultatele obținute care este apoi trecut la postprocesor.

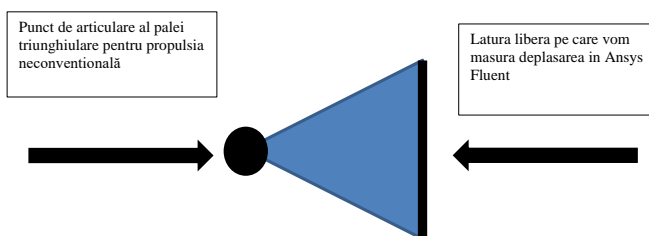


Figure 3.10.: Schema de simulare a palei triunghiulare

Pentru trasarea graficelor exemplu s-au folosit următorii parametri în Fluent

- Dimensiune latura în simulare parametrică: 5, 10, 15 și 20 cm.
- Faza inițială 0 grade
- Frecvență de lucru 0.5- 2 Hz

Aparat matematic: Studiul mișcării palei de propulsie tip „Dolphin tail” se poate face utilizând mai multe sisteme de coordonate, rezultatele finale fiind, evident, aceleași. Ca o aplicație a studiului mișcării unui punct material în diferite sisteme de coordonate, vom prezenta studiul mișcării palei de propulsie tip „Dolphin tail” în sistemele de coordonate carteziene, polare și Frenet.

1. *Studiul mișcării palei de propulsie tip „Dolphin tail” în sistemul de coordonate carteziene*

Se consideră un punct material care descrie o traiectorie circulară pe un arc de cerc de rază  $r$  (fig. 3.18).

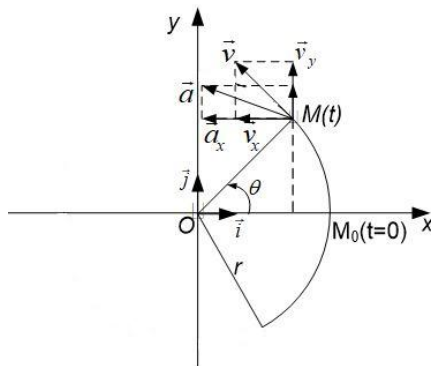


Fig. 3.11

Dacă se alege sistemul de axe cartezian cu originea în centrul cercului și axele  $Ox$  și  $Oy$  în planul mișcării, poziția punctului material pe traiectorie, la momentul oarecare  $t$ , este dată de coordonatele carteziene  $x$  și  $y$ , care pot fi scrise sub forma:

$$\begin{cases} x = r \cdot \cos \theta \\ y = r \cdot \sin \theta \end{cases} \quad (3.3)$$

în care  $\theta$  este unghiul făcut de raza traiectoriei cu axa  $Ox$ , și reprezintă parametrul în ecuațiile parametrice (3.3).



Ecuția traiectoriei se obține eliminând parametrul din ecuațiile parametrice ale mișcării (ridicând la pătrat și însumând relațiile (3.3)). Se obține:

$$x^2 + y^2 = r^2 \quad (3.4)$$

care verifică faptul că traiectoria este un arc de cerc cu centrul în origine și raza  $r$ .

Vectorul de poziție al punctului material la momentul  $t$  are expresia:

$$\vec{r} = r \cdot \vec{u}_\rho \quad (3.9)$$

din care, prin derivare, rezultă expresia vitezei:

$$\begin{aligned} \vec{v} &= \dot{r} \cdot \vec{u}_\rho + r \cdot \dot{\vec{u}}_\rho = \dot{\theta} \cdot r \cdot \vec{u}_\theta \\ &= \omega \cdot r \cdot \vec{u}_\theta \end{aligned} \quad (3.10)$$

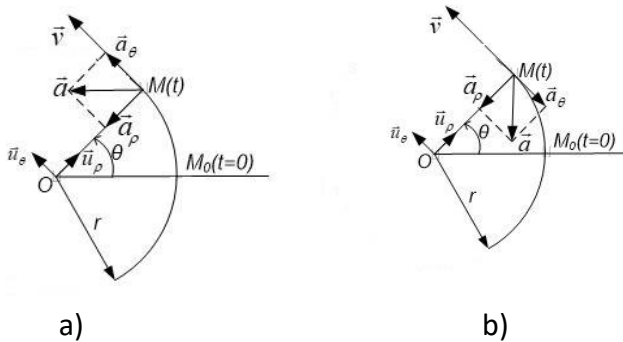


Fig. 3.12

Din relația (3.10) se observă că viteza punctului material în mișcarea circulară este un vector pe direcția versorului  $\vec{u}_\theta$  (tangent la traiectorie) și are mărimea:

$$|\vec{v}| = \omega \cdot r$$

Accelerația se obține derivând expresia vitezei:

Prin funcția [Force\_x] vom calcula forța de împingere în kg. Această funcție are rolul de a integra presiunile ce apar pe pala cu formă triunghilară realizată în partea de DesignModeller pe suprafațele superioară și

Contribuții la studiul dinamicii unui sist. de propulsie navală neconvențională inferioară simultan. Rezultatele funcției [Force\_x] sunt prezentate în tabelul 3.1.

Tabel 3.1. Rezultate funcției [Force\_x] pentru forța de împingere [kg]

<b>Forță de împingere</b>	<b>Test 1</b>	<b>Test 2</b>	<b>Test 3</b>	<b>Test 4</b>
Simulare ANSYS [kg]	1.200	8.874	0.770	9.854

Rezultatele prezentate in Fig. 3.24. se pot actualiza prin modificarea parametrilor de intrare ai simulării și pot genera rezultate pentru orice dimensiune a palei triunghiulare utilizate.

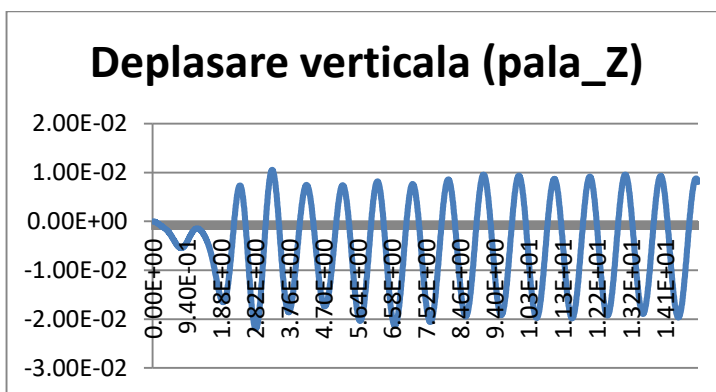


Fig.3.24. Oscilația verticală a laturei libere pe direcția Z

Cea mai mare provocare pentru desfășurarea simulărilor de acest tip este definirea uneltelor teoretice pentru o predicție clară și robustă și validarea pe bază experimentală la scară sau cu ajutorul criteriilor de similitudine.

## **CAPITOLUL IV**

### **METODE EXPERIMENTALE DE DETERMINARE A MĂRIMILOR CARACTERISTICE A PROPULSOARELOR NAVALE NECONVENȚIONALE**

#### **4.1. Organizarea măsurătorilor pentru determinarea mărimilor caracteristice a propulsoarelor navale neconvenționale**

Măsurătorile s-au desfășurat în laboratoarele Universității Maritime din Constanta. Pentru măsurători am folosit bazinul de încercări și am folosit mecanisme de prindere și senzori descriși mai jos.

Pentru finalizarea studiului propulsoarelor navale neconventionale, ipotezele și calculele teoretice privind curgerea apei valorile parametrilor rezultați prin simularea numerică cu Computational Fluid Dynamics ANSYS-Fluent, au fost validate experimental.

Obiectivele principale ale activității de validare pe modelele realizate au fost:

- Măsurarea forțelor de împingere create pentru diferite frecvențe de lucru.
- Calcularea amplitudinilor de lucru pentru modelele de test
- Compararea rezultatelor obținute prin simularea numerică cu CFD ANSYS Fluent, cu cele obținute la

Contribuții la studiul dinamicii unui sist. de propulsie navală neconvențională testările reale.

- Alegerea modelului optim constructive dintre modelele studiate și explicarea selecției.
- Determinarea presiunilor și dinamicii din jurul palei propulsorului de tip “Dolphin tail”.

#### 4.2. Descrierea standului de test

Standul de test este realizat dintr-un motor electric cu 2 trepte de turație care antrenează în mișcare oscilatorie modelele de test în conformitate cu schema din figura 4.1.

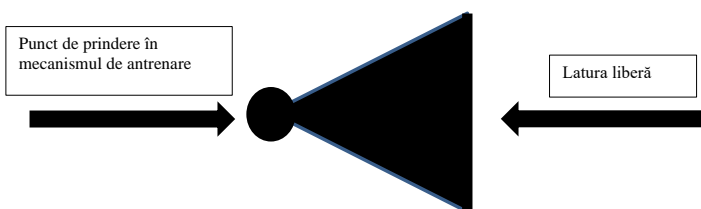


Figure 4.1.: Schema prindere în standul de testare

Pe standul de test au fost montate 5 modele diferite:

- 4 triunghiuri echilaterale cu dimensiune l - latura de: 5, 10, 15 și 20 cm (de culoare neagră),
- un model suplimentar cu latura de 20 cm (albastru).

Se observă că forța de împingere are valori aproape constante în momentul în care propulsia neconvențională este stabilizată pe durata testului. Valori mai mari sau mici se observă în momentul în care pala de propulsie își modifică unghiul de înclinare față de orizontală. De aceea

Contribuții la studiul dinamicii unui sist. de propulsie navală neconvențională  
în toate testele se mentine pala în poziție orizontală pentru evitarea acestor efecte.



Fig. 4.2. Modele fizice pentru teste de bazin

#### 4.3. Modul de măsurare a mărimilor caracteristice a propulsoarelor navale neconventionale

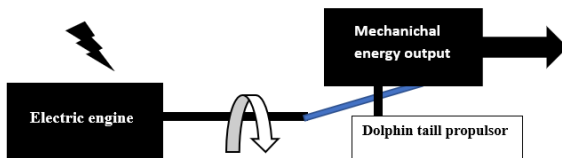


Fig. 4.7. Schema de lucru pentru efectuarea testelor de bazin



Fig. 4.8. Testare inițială cu elice standard pentru analiză comparativă



Fig. 4.9. Măsurare a mărimilor caracteristice a propulsoarelor navale neconvenționale

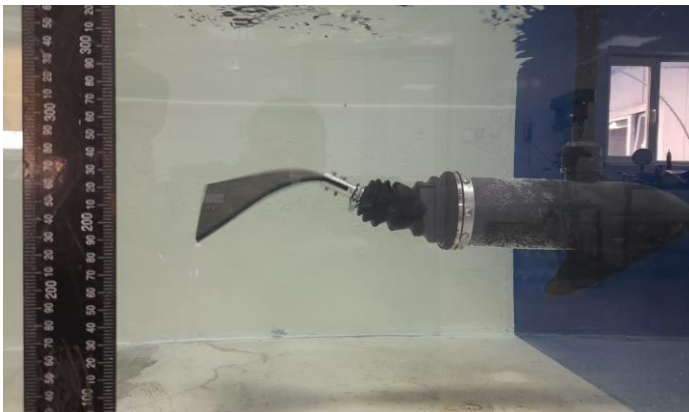


Fig. 4.10. Măsurarea amplitudinilor de mișcare pala\_z  
(test 1)

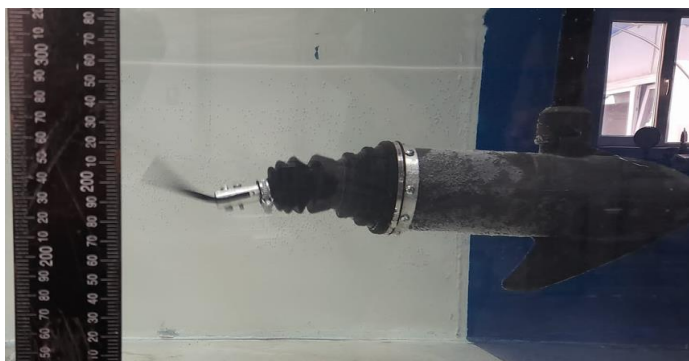


Fig. 4.11. Măsurarea amplitudinilor de mișcare pala\_z  
(test 2)



Fig. 4.12. Măsurarea amplitudinilor de mișcare pala\_z  
(test 3)

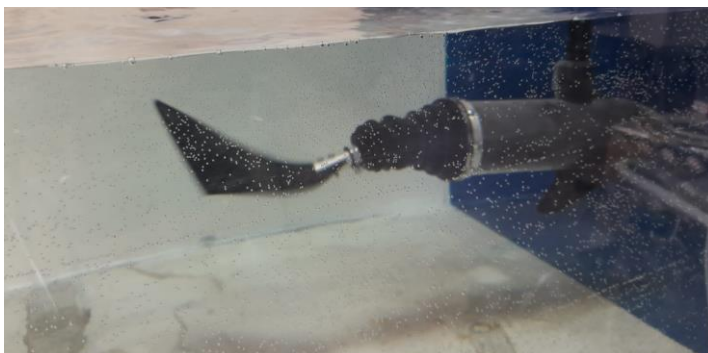


Fig. 4.13. Măsurarea amplitudinilor de mișcare pala\_z  
(test 4)





Fig. 4.14. Măsurarea amplitudinilor de mișcare pala\_z (test 5)

#### 4.4. Rezultate de măsurare a mărimilor caracteristice a propulsoarelor navale neconvenționale

Tabel 4.1. Rezultate de măsurare a mărimilor caracteristice a propulsoarelor navale neconvenționale

	Model 1 Coadă 15/15/15	Model 2 Coadă 20/20/20	Model 3 Coadă 25/25/25	Model 4 Plastic albastru ABS 20/20/20	Model 5 elice standard
Treapta 1 [Kg]	1.285	0.210	0.495	0.805	7.000
Treapta 2 [Kg]	0.565	0.865	1.777	0.965	10.000
Treapta 1 [%]	18.357	3.000	7.071	11.500	100.000
Treapta 2 [%]	5.650	8.650	17.770	9.650	100.000

Tabel 4.2. Rezultate de măsurare putere electrică a propulsoarelor navale neconventionale testate

	Model 1 Coadă 15/15/15	Model 2 Coadă 20/20/20	Model 3 Coadă 25/25/25	Model 4 Plastic albastru ABS 20/20/20	Model 5 elice standard
Treapta 1 [W]	70.700	79.770	102.480	69.310	62.830
Treapta 2 [W]	121.400	160.800	180.000	162.000	120.000
Treapta 1 [%]	112.526	126.962	163.107	110.314	100.000
Treapta 2 [%]	101.167	134.000	150.000	135.000	100.000
Treapta 1 [ $\eta$ ]	1.818	0.263	0.483	1.161	11.141
Treapta 2 [ $\eta$ ]	0.465	0.538	0.987	0.596	8.333

În figura 4.15 sunt prezentate grafic rezultatele de măsurare a împingerii [kg] propulsoarelor navale neconventionale pentru cele 4 modele de test conform tabel 4.1.

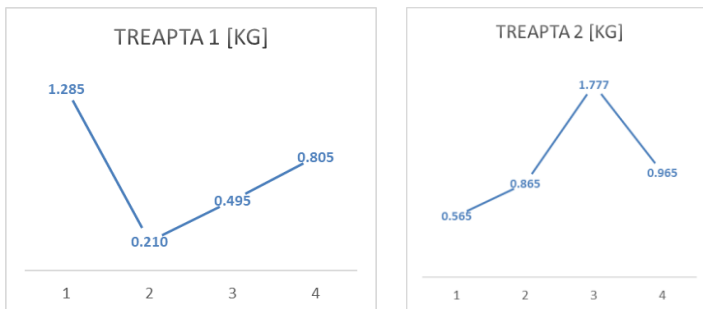


Fig. 4.15. Grafic rezultate de măsurare a împingerii[kg] propulsoarelor navale neconventionale

În figura 4.16 sunt prezentate grafic rezultatele de măsurare a împingerii [%] a propulsoarelor navale neconventionale comparativ cu propulsor elice pentru cele 4 modele de test conform tabel 4.1

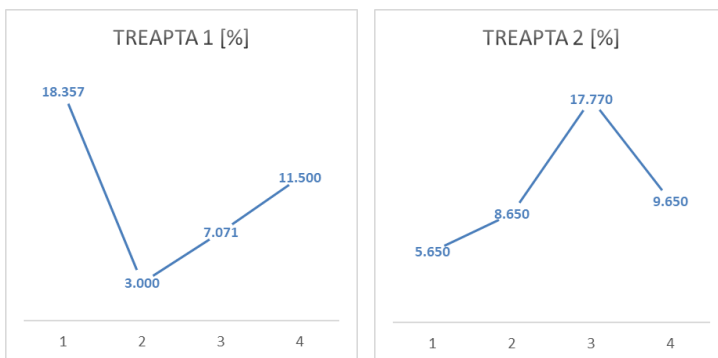


Fig. 4.16. Grafic rezultate de măsurare a împingerii [%] a propulsoarelor navale neconventionale comparativ cu propulsor elice

În figura 4.17 sunt prezentate grafic rezultatele de măsurare consum putere [W] propulsoarelor navale neconventionale pentru cele 4 modele de test conform tabel 4.2.

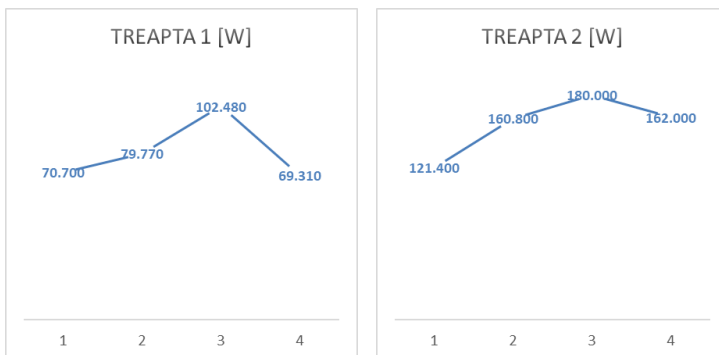


Fig. 4.17. Grafic rezultate de măsurare consum putere [W] propulsoarelor navale neconventionale

În figura 4.18 sunt prezentate grafic rezultatele de măsurare consum putere [%] a propulsoarelor navale neconventionale comparativ cu propulsor elice pentru cele 4 modele de test conform tabel 4.2

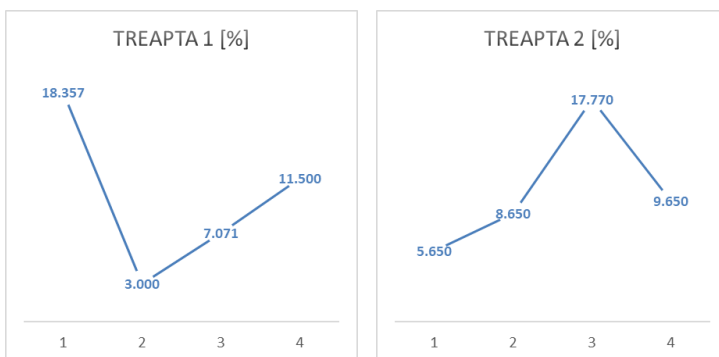


Fig. 4.18. Grafic rezultate de măsurare consum putere

[%] a propulsoarelor navale neconventionale  
comparativ cu propulsor elice

În figura 4.19 sunt prezentate grafic rezultatele de măsurare pentru randamentul  $[\eta]$  propulsoarelor navale neconventionale conform tabel 4.2

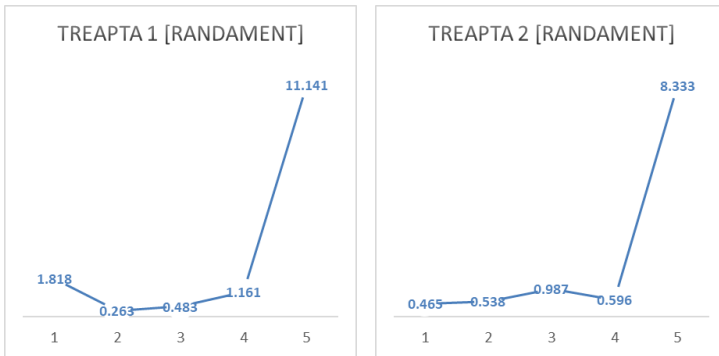


Fig. 4.19. Grafic rezultate de măsurare pentru randamentul  $[\eta]$  propulsoarelor navale neconventionale

## **CAPITOLUL V**

### **ANALIZA ȘI OPTIMIZAREA SISTEMULUI DE PROPULSIE “TIP COADĂ” SAU “DOLPHIN TAIL”**

#### **5.1. Analiza rezultatelor obținute pentru validarea modelului**

Pentru a analiza propulsiei neconventionale studiate de tip „Dolphin Tail” (DT) și pentru a înțelege modul de lucru am utilizat simulatorul CFD pentru analiza unui model parametric. Forțele și amplitudinile rezultate în simulare au fost limitate de dimensiunile și de capacitatea bazinului de test. Descrierea modelelor utilizate a fost făcută deja în capitolul IV.

Utilizarea simulărilor Ansys a stat la bază pentru crearea și realizarea modelului de test și pentru stabilirea dimensiunilor palelor triunghiulare de tip Dolphin Tail . Simulările s-au efectuat pe parcursul mai multor sesiuni pentru a rula fiecare model testat ulterior fizic.

Condiții inițiale:

- se consideră viteza navei zero;
- orientarea palei de test pe direcția orizontală
- Motorul de antrenare lucrează întodeauna la 100%
- condiții simulare și bazin de test: suprafața apei este calmă
- Poziția de lucru în bazin/ domeniul fluid simulat este întodeauna aceeași pentru centrul palei sistemului de propulsie.

Pe timpul fiecărui tip de test s-au urmărit corectitudinea măsurărilor și s-au efectuat minim 3

măsuratori în fiecare situație. Valorile prezentate sunt o medie a măsurătorilor considerate valide pe timpul testelor de bazin.

Reglajele efectuate pentru testele de bazin au rolul de a calibra măsurătorile și de a obține o indicație cât mai exactă asupra modelelor testate comparativ cu elicea de propulsie clasică.

Verificările și inspecțiile pe timpul fiecărui test au fost făcute în următoarea ordine pentru a asigura o testare riguroasă:

1. Verificare fixare în stand de măsurare
2. Setarea generatorului de oscilații în poziție 0
3. Pornire instrumente de măsură forță
4. Verificare și reglare unghi de pornire pentru a obține palele în planul orizontal la porirea testelor
5. Măsurare amplitudini și forțe de împingere generate ca în fig 5.1.

Se observă că forța de împingere are valori aproape constante în momentul în care propulsia neconventională este stabilizată pe durata testului. Valori mai mari sau mici se observă în momentul în care pala de propulsie își modifică unghiul de înclinare față de orizontală. De aceea în toate testele se menține pala în poziție orizontală pentru evitarea acestor efecte.

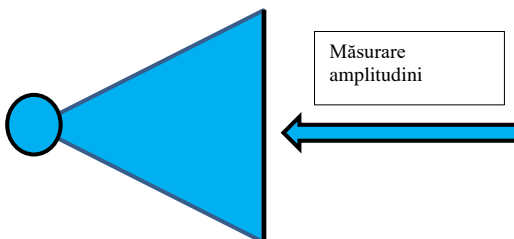


Figure 5.1.: Schema măsurare amplitudini în teste

Pe standul de test au fost montate 5 modele diferite

Contribuții la studiul dinamicii unui sist. de propulsie navală neconvențională

și au fost rulate simulări Ansys pentru dimensiunile existente ale modelelor:

- 4 triunghiuri echilaterale cu dimensiune latura de: 5,10, 15 și 20 (de culoare neagră),
- un model suplimentar cu latura de 15 cm (albastru).

Toate modelele utilizate au fost stocate într-o bază de date. Modelul Ansys va putea fi folosit mai târziu pentru orice altă dimensiune și formă a propulsiei neconventionale studiate.

Parametrii modelului au putut fi modificați în timpul simulărilor pentru toate dimensiunile solicitate și posibil de utilizat în bazinul de testare.

Schimbările au fost relevante pentru înțelegerea diferențelor de date între intrare (input) și ieșirea (output) sistemului de testare prezentat în figura 5.2.

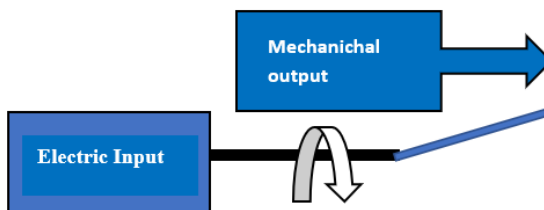


Fig. 5.2. Input/Output sistem de măsurare

Simularea generală fost materializată prin utilizarea softurilor ce țin de CFD (programul ANSYS) și măsurarea în bazinul modificat de testare s-a făcut în laboratoarele Universității Maritime din Constanța.

Postprocesarea este componenta CFD utilizată pentru a analiza, a vizualiza și a prezenta rezultatele interactiv. Post-procesarea include orice, de la obținerea valorilor punctului la secvențe animate complexe.



Câteva exemple de caracteristici importante ale postprocesoarelor CFD sunt:

- Vizualizarea sistemului 3D și a volumelor implicate în analiză
- Vizualizare grafică vectorială care arată direcția și amplitudinea fluxului
- Vizualizarea variației variabilelor scalare (variabile care au numai magnitudine, nu direcție, cum ar fi temperatura, presiunea și viteza) în domeniul studiat
- Calcule cantitative numerice
- Animație
- Ridicarea de diagrame în funcție de parametrii aleși
- Posibilitate de generare de rapoarte pe format fizic (hârtie) și/sau electronic pentru mărimile caracteristice propulsorului neconventional studiat.

## 5.2. Prezentarea rezultatelor simulării și măsurătorilor suprapuse

În tabelul 5.1. sunt prezentate funcțiile de împingere pentru modelele studiate pornind de la planul orizontal ( $\alpha = 0$ ).

Tabel 5.1. Rezultate comparative pentru mărimile caracteristice a propulsoarelor navale neconventionale (treapta 1)

<b>Forță de împingere</b>	<b>Test 1</b>	<b>Test 2</b>	<b>Test 3</b>	<b>Test 4</b>
Teste de bazin [kg]	1.285	0.210	0.495	0.805
Simulare ANSYS [kg]	1.200	8.874	0.770	9.854

S-au utilizat notațiile de mai jos:

- amplitudinea mișcărilor verticale ale palei,  $pala_z$  [m];
- amplitudinea mișcărilor unghiulare ale modelului experimental,  $\theta$  [grade];
- frecvența mișcărilor unghiulare ale modelului experimental,  $f_w$  [Hz].

Pe baza acestor mărimi fizice, s-au trasat grafic amplitudinile pentru mișcarea verticală a modelului experimental.

Trasarea graficelor din fig 5.3. și 5.4. se va face prin interpolare liniară cu ajutorul aplicației Microsoft Excel pentru valorile prezentate în tabel 5.1.

Dificultatea de a genera modele fizice pentru toate valorile din grafice este ușurată pentru această validare prin modificarea facilă a parametrilor software ANSYS Fluent TM. Astfel, vom putea evalua deplasările verticale ale capătului palei ce apar în cadrul software cu ajutorul testelor de bazin. Diferențele procentuale de mai puțin de 10% confirmă o interpretare software corectă a dinamicii propulsorului neconventional.

În comparațiile efectuate am identificat diferențe și variații în unele zone de frecvență care provin din faptul că bazinul UMC este unul de dimensiuni reduse și are anumite limitări la utilizarea modelelor cu dimensiuni mari.

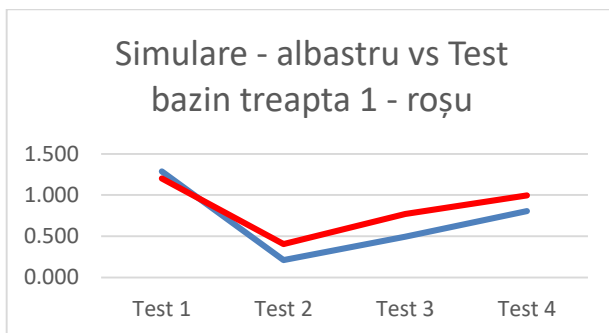


Fig. 5.3. Suprapunere valori pentru simulări Ansys și măsurători de bazin

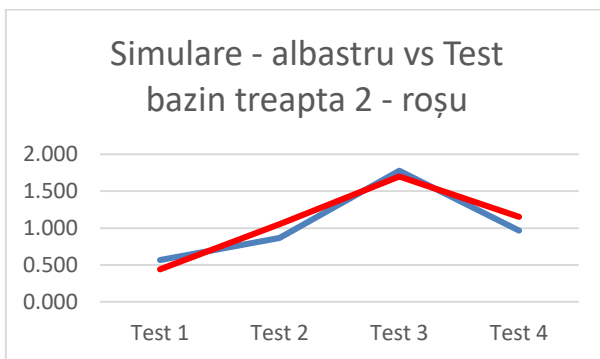


Fig. 5.4. Suprapunere valori pentru simulări Ansys și măsurători de bazin

Pentru a compara rezultatele pentru modelele simulate și pentru testele de bazin pe model vom compara amplitudinile obținute.

Testele confirmă astfel rezultatele simularilor prin diferențe reduse pentru valoarea împingerii generate și diferențele procentuale sesizate între modelul experimental și cel realizat CFD reprezintă diferențe uzuale. Se poate observa în figura 5.3 că valorile obținute în testele de bazin urmează trendul și se apropie de valorile obținute în simularile numerice. Astfel datele măsurate confirmă

graficele obținute prin interpolarea liniară a datelor de simulare.

### **5.3. Interpretarea rezultatelor obținute prin simularea numerică cu CFD ANSYS Fluent și prin testările reale**

Pentru finalizarea studiului privind comportarea dinamice a propulsiei neconventionale în plan orizontal, ipotezele și calculele teoretice privind valorile parametrilor rezultați prin simularea numerică cu Computational Fluid Dynamics ANSYS-Fluent, au fost validate experimental. Variațiile modelelor și a dimensiunilor paletelor de lucru au permis măsurarea în laboratorul Universității Maritime Constanța.

Validarea modelului matematic al comportării dinamice a propulsiei neconventionale în plan orizontal s-a realizat prin teste experimentale pe model construit conform specificațiilor bazinului. Modelul prezentat și echipamentul de conversie a mișcării circulare - mișcare de oscilație a fost realizat de către autorul tezei în laboratoarele Universității Maritime din Constanța.

Analiza comparativă a rezultatelor obținute din simulări și teste de bazin pentru studiul propulsiei neconvenționale face referiri la comportarea acestora în apă calmă și în ipoteza amplasării în plan orizontal. În acest caz, diferențele cele mai mari de până la 10% au avut loc la modelele cu dimensiuni mari, datorită interacțiunii cu pereții bazinului de testare.

Aceste teste pot să fie repetate pentru orice forme constructive oferind astfel posibilități de utilizare a funcțiilor de împingere în diferite aplicații.

Tabel 5.2. Diferențe procentuale pentru mărimile caracteristice a propulsoarelor navale neconventionale

	<b>Test 1</b>	<b>Test 2</b>	<b>Test 3</b>	<b>Test 4</b>
Diferențe procentuale d [%]	7.08	2.3	4.5	9

Analiza rezultatelor prezentate în tabel 5.2, obținute prin simulare numerică și cele din măsurători experimentale prezintă diferențe de 5 - 10%. 2 din teste sunt sub 5% și 2 între 5 și 10%. Aceste rezultate confirmă simulările efectuate și vin în sprijinul cercetării sistemelor de propulsie neconventionale. Cauzele posibile ale apariției acestor diferențe uzuale în simulările CFD sunt provenite din ipotezele simplificatoare prezentate în capitolul III al prezentei teze. Valorile din datele experimentale sunt în general mai mari decât valorile simulate deoarece în cadrul testelor de bazin se studiază fenomenul real și integrarea presiunilor nu acopera în întregime fenomenul propulsiei neconvenționale de tip coadă de delfin.

Analiza factorilor de influență ai discretizării în analiza numerică se poate face o distincție netă între:

1. discretizarea structurilor care au un suport fizic,
2. discretizarea corpurilor solide sau fluide care este un proces pur matematic (Fluent).

O serie de factori identificați care condiționează discretizarea palei triunghiulare sunt:

- tipul elementelor finite: se aleg funcție de tipul problemei și domeniul de analiză, de precizia dorită, de variația mărimii necunoscute etc. Elementele parabolice sunt preferate elementelor liniare, intrucat la același număr de noduri soluția discretizării cu elemente parabolice este mai

precisă decât cea cu elemente liniare. Dacă există mai multe tipuri de elemente finite la graniță dintre ele trebuie să se asigure continuitatea;

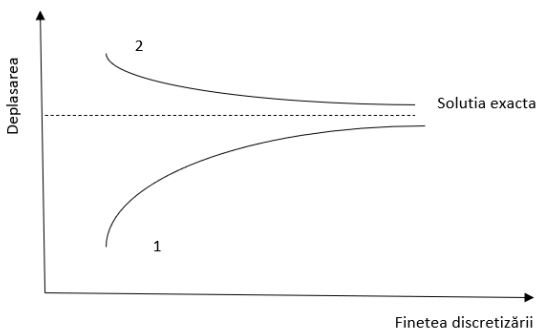


Fig. 5.5. Influența numărului de elemente (noduri) asupra preciziei în analiza CFD

- mărimea și numărul elementelor finite influențează convergența soluției (se observă că la un număr mai mare de elemente rezultatul se apropie către soluția exactă dar creșterea excesivă nu face decât să conducă la un volum foarte mare de calcule și deci să crească timpul de analiză. Convergența de regulă corespunde curbei 1 dar sunt elemente finite pentru care convergența este de tipul curbei 2 sau chiar cu convergență oscilantă;
- poziționarea nodurilor, care în general se face uniform în structură. Discontinuitățile în geometrie sau în încărcare impun alegerea unor noduri suplimentare. Trecerea de la o zonă cu discretizare fină la una cu discretizare modestă se face progresiv, nu brusc;
- gradul de uniformitate al rețelei de elemente finite. Se evită folosirea elementelor cu formă exagerat

distorsionată, adică elemente alungite și/sau elemente care au fețe care nu se încadrează într-un plan. Preferabil ar fi ca discretizarea cu triunghiuri să conțină numai triunghiuri echilaterale, discretizarea cu patrulatere să conțină doar pătrate iar cea spațială cu brickuri să conțină elemente cubice etc;

- stabilirea zonelor de frontieră, pentru introducerea corectă a condițiilor la limită;
- numărul maxim de noduri sau elemente permis de programul Ansys Fluent.

Diferențele identificate între simulările efectuate au avut diferențe de maxim 10% față de datele prezentate în capitolul de simulare. Datele prezentate au ajutat la validarea modului corect de lucru pe o pală simplă triunghiulară și au verificat buna funcționare a ANSYS Fluent. Diferențele prezentate provin din imposibilitatea realizării unor discretizări foarte fine pentru domeniul utilizat în cadrul Fluent. Compromisul realizat software a fost discretizarea zonelor de interes (proximitatea structurii și suprafața liberă a lichidului) și o analiză mai grosieră pentru restul domeniului, toate acestea fiind realizate pentru a nu depăși posibilitățile hardware actuale ce limitează numărul de celule utilizate într-o simulare la un maxim de 4.000.000 celule. Metoda VoF presupune adăugarea unei caracteristici de densitate și rezolvarea unui domeniu CFD cu un solver bazat pe diferențe de presiune.

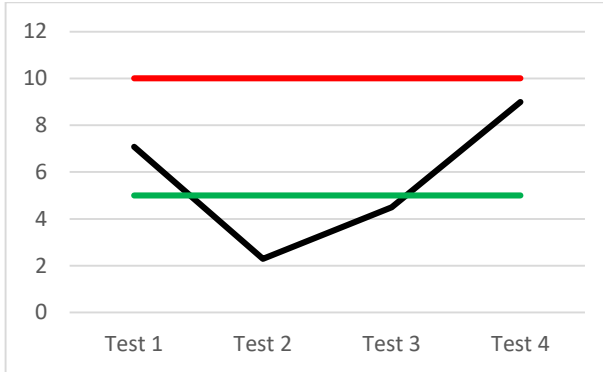


Fig. 5.4. Prezentare diferențe procentuale (negru) și limitele de 5% (verde) și 10% (roșu)

Rezultatele prezentate pentru o pală triunghiulară au fost realizate cu ajutorul Ansys Fluent și relevă o comportare similară celei prezentate în literatura de specialitate și confirmate de modul în care natura a dezvoltat coada faunei marine. Alături de graficele prezentate pentru o pală triunghiulară ține seamă de efectele maselor adiționale și a forțelor Krylov.

Nu există software care să nu realizeze interpolare pentru trasarea graficului funcției 5.4. Cu alte cuvinte, orice soft va considera un număr de puncte în intervalul de studiu, va efectua calculul pentru acele valori și ulterior prin interpolare va trasa graficul. Trebuie avut în vedere că un număr mic de valori de interpolat poate conduce la o precizie scăzută a rezultatelor grafice.

Funcțiile 5.2 și 5.3 sunt o noțiune abstractă pentru treptele de turatie considerate ce înglobează toate caracteristicile unor efecte hidrodinamice destul de dificil de trasat în ecuații matematice. De aceea verificarea validității lor este dificilă. Testul de bazin oferă date de comparație de la o structură reală la scară și ajută la validarea datelor numerice obținute în Fluent.



Pala triunghiulară are la o frecvență mare un comportament dictat de forțele de inerție și acestea suprimă răspunsul forței de împingere, ceea ce face ca valoarea funcției de împingere să tindă la 0 pentru frecvențe mari (turații mari în bazin).

De asemenea, în cazul mișcărilor cu perioadă mare (mai mult de 30 secunde), structura tinde să se comporte ca o structură cu dimensiuni reduse datorită reducerii presiunii pe pala triunghiulară.

În cadrul simulărilor numerice, am eliminat frecările de pe pereții domeniului de studiu în ANSYS Fluent a zonelor respective, ceea ce corespunde comportării propulsiei în mare larg deschisă. Studiile de bazin au avut loc într-un spațiu cu lățime limitată ce poate aduce o influență comportării forței de împingere/propulsiei în studiu prin interacțiunea propulsor-bazin.

Domeniul propulsiei neconvenționale este într-o dezvoltare permanentă și presupune cercetări cu ajutorul: programelor numerice de calcul dedicate ingineriei, testelor de bazin și încercărilor pe structuri pilot.

#### **5.4. Optimizarea performanțelor sistemului de propulsie “tip coadă” sau “dolphin tail”**

Pentru îmbunătățirea caracteristicilor de răspuns a sistemului de propulsie “tip coadă” sau “dolphin tail” în apă calmă se pot utiliza mecanisme și sisteme suplimentare în diferite forme pasive sau active. Aceste mecanisme au rolul de a reduce mișcările induse de propulsia tip dolphin tail în corpul ambarcațiunii propulsate.

Sistemele pasive nu au o sursă de alimentare externă și nu necesită un control deosebit. Aceste sisteme au rolul de a crea un moment/forță opusă copului structurii navei sau structurii semisubmersibile pentru a reduce sau

Contribuții la studiul dinamicii unui sist. de propulsie navală neconvențională

amortiza mișcarea pe direcția dorită. Cele mai cunoscute sisteme pasive pot fi atasate corpului propulsat pentru creșterea performanței sistemului de propulsie “tip coadă” sau “dolphin tail” sunt:

- Chile de rului
- Aripioare pasive,
- Sistem pasiv de tancuri și
- Sistem pasiv de mase în mișcare.

Sistemele active sunt cele la care momentele create sunt realizate cu ajutorul unei surse externe de energie și care sunt create/controlate cu sisteme moderne de control.

Cele mai cunoscute sisteme active sunt:

- Stabilizatoare anti-rului active,
- Sistem de tancuri active,
- Sisteme de mase active și
- Giroscopae.

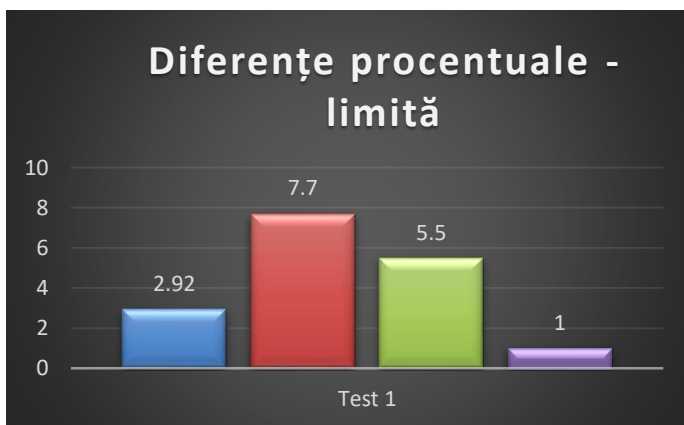


Fig. 5.4. Diferențe procentuale raportate la limita stabilită în testul 1

Evaluarea comportării fiecărei pale de propulsie se va face cu ajutorul funcțiilor de împingere pentru diferite situații de exploatare și trasarea acestora se va face pentru

diferite frecvențe de lucru pentru identificarea zonelor optime de lucru și se vor valida cu ajutorul testelor de bazin. Se recomandă utilizarea în practică a unor teste de bazin cu diferențe procentuale cât mai reduse (fig 5.4 este data exemplu pentru testul 1) pentru o acuratețe ridicată a rezultatelor de validare.

## CAPITOLUL VI CONCLUZII

Prezenta lucrare a colectat și utilizat toate informațiile actualizate despre sistemele de propulsie neconvenționale și le-a prelucrat într-un mod numeric și practic și reprezintă o cercetare pentru aplicarea celor mai noi tehnologii. Propulsia studiată în această lucrare a fost studiată în cadrul Universității Maritime Constanța cu cele mai noi programe ANSYS și testată în laborator.

Lucrarea a acoperit trei direcții de cercetare majore:

- Simularea cu ajutorul software ANSYS în mediul CFD.
- Validarea rezultatelor numerice ANSYS pe baza rezultatelor experimentale obținute în laborator.
- Analiza funcțiilor de împingere pentru identificarea efectului avut de sistemul de propulsie neconvențională.

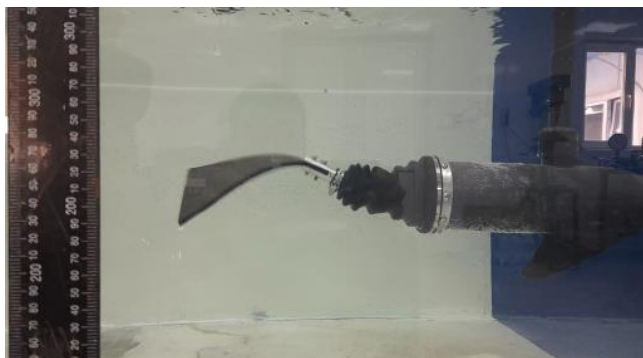


Fig. 6.1. Validarea rezultatelor numerice ANSYS pe baza rezultatelor experimentale obținute în laborator

Lucrarea conține toate elementele din teoria propulsorului clasic și indica modul în care se pot efectua cele mai noi modelări numerice pentru instalațiile de propulsie în relație cu teoria turbulentă și modelul SKE.

Rezultatele tezei se vor utiliza pentru următoarele direcții de studiu:

- Graficele forțelor de împingere pentru alte sisteme similare
- Graficele funcțiilor de randament prezentate
- Graficele diferentelor procentuale identificate
- Analize pertinente pentru vitoarele necesități ale industriei sau mediului academic

Capitolul 3 a conținut caracterizare software-ului Ansys TM Fluent și a modului de lucru pentru analiza numerică a propulsiei navale neconvenționale. Schema modelului de calcul al programului FLUENT a fost prezentată în detaliu pentru o mai bună înțelegere a modului de calcul. Aceste aspecte se pot utiliza pentru orice alt tip de propulsie.

Determinarea deplasării palei de propulsie tip „Dolphin tail” s-a realizat pe baza ipotezelor prezentate în capitolul de simulare pentru modelul 3D. Schema de simulare a palei triunghiulare a fost prezentată și realizată grafic în simularea parametrică.

Se observă în lucrare că forța de împingere are valori aproape constante în momentul în care propulsia neconvențională este stabilizată pe durata testului. Valori mai mari sau mici se observă în momentul în care pala de propulsie își modifică unghiul de înclinare față de orizontală. De aceea în toate testele se menține pala în poziție orizontală pentru evitarea acestor efecte. Simularile efectuate și testele de laborator au toate pala în poziție inițială orizontală.

Pe timpul fiecărui tip de test s-a urmărit corectitudinea măsurărilor și s-au efectuat minim 3 măsuratori în fiecare situație. Valorile prezentate sunt marimile ce validează [modelul numeric].

Pe timpul testelor este obligatorie calibrarea pentru fiecare testare pentru a obține o indicație cât mai clară asupra rezultatului.

Verificările și inspecțiile pe timpul fiecărui test trebuie făcute în următoarea ordine pentru a asigura o testare riguroasă:

1. Verificare fixare în stand de măsurare;
2. Setarea generatorului de oscilații în poziție 0;
3. Pornire instrumente de măsură forță;
4. Verificare și reglare unghi de pornire pentru a obține palele în planul orizontal la pornirea testelor.

Cercetările efectuate în cadrul acestei teze prezintă numeroase elemente de analiză a sistemului de propulsie navală neconvențională. Prin trasarea și validarea funcțiilor de împingere pentru o pală s-a realizat o analiză completă a modului în care lucrează această propulsie. Funcțiile de împingere sau graficele trasate în această teză pot servi pot oferi informațiile necesare proiectării unui astfel de sistem de propulsie sau pot reprezenta un punct de pornire în cadrul proiectelor de propulsii navale

Rezultatele tezei au fost diseminate în diverse articole și manifestări științifice de prestigiu din domeniu și acceptate în urma unui proces de recenzie.

## **CAPITOLUL VII**

### **CONTRIBUȚII PERSONALE.**

### **DIRECȚII DE CERCETARE**

Cercetările efectuate în cadrul acestei teze prezintă numeroase elemente de analiză a sistemului de propulsie navală neconvențională. Prin rezultatele tezei am identificat următoarele posibilități de cercetare viitoare:

1. Simularea acțiunii sistemelor de propulsie neconventionale în valurilor
2. Continuarea experimentărilor pe modelul existent
3. Studiarea altor modele matematice și a altor unelte software pentru estimarea numerică a acestor probleme

#### **7.1. Simularea acțiunii sistemelor de propulsie neconventionale în mare agitată**

Pe măsură ce alte situații de analiză vor fi disponibile, odată cu dezvoltarea resurselor hardware ale UMC, simulările actuale pot să fie reluate și reanalizate. Se pot evalua concepte noi în domeniul propulsiilor navale.

Pentru analiza propulsiei navale se pot studia pe bazele actualei teze și alte sisteme și domenii precum:

- Graficele forțelor de împingere pentru alte sisteme similare;
- Graficele funcțiilor de randament prezentate;
- Graficele diferențelor procentuale identificate;
- Prezentarea unor analize pertinente pentru viitoarele necesități ale industriei sau mediului academic.

## 7.2. Continuarea experimentărilor pe modelul existent

Existența standului de test și modelelor la scară permite evaluarea unor situații noi pentru frecvențe sau moduri de lucru cu diverse particularități.

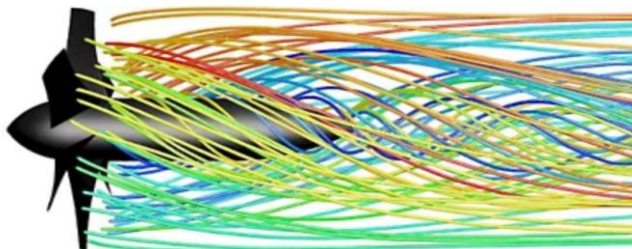


Fig. 7.2. Realizarea de analize similare pe alte propulsii navale

Posibilitățile viitoare de studiu pot include contribuții referitoare la optimizarea formelor pe baze multicriteriale care să aibă în vedere în special funcțiile de împingere ale propulsiei navale, dar și rezistența structurală a palei. Existența acestui stand de testare a modelelor la scară în cadrul Universității Maritime Constanța poate servi pentru efectuarea de experimente ale cadrelor didactice, dar și ale studenților.

Forma triunghiulară a palei de lucru și particularitățile constructive pot reprezenta o provocare pentru viitoarele proiecte de cercetare și chiar pentru proiectele de diplomă ale studenților universității.



### 7.3. Studiarea altor modele matematice și a altor unelte software pentru estimarea numerică a acestor probleme

Funcțiile trasate în această lucrare pot servi diverselor aplicații sau proiecte de cercetare viitoare. Acestea reprezintă o direcție ce trebuie dezvoltată pe un număr mare de modele matematice și pe rezultate experimentale pentru a putea dezvolta domeniul propulsiei navale neconvenționale. Cercetările ulterioare pot include studiul unor fenomene conexe domeniului studiat în vederea găsiți de soluții adecvate domeniului naval și celui al energiei regenerabile.

Conversia electrică-mecanică a propulsorului naval neconvențional (Fig. 7.1) presupune o sursă electrică de alimentare. De aceea consider că există posibilitatea dezvoltării unui sistem mixt cu o resursă regenerabilă (solar, eolian, val)

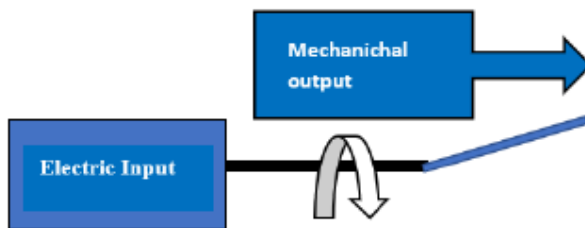


Fig. 7.2. Conversia electrică-mecanică a propulsorului naval neconvențional

Funcțiile de împingere sau graficele trasate în această teză pot servi pot oferi informațiile necesare proiectării unui astfel de sistem de propulsie sau pot reprezenta un punct de pornire în cadrul proiectelor de propulsii navale.

## Lista principalelor abrevieri

3D	Tridimensional	Tridimensional
CFD	Computational Fluid Dynamics	Mecanica Fluidelor realizata numeric
DNV	Det Norske Veritas	
DT	Dolphin Tail	propulsie “tip coadă”
dwt	Deadweight (of a ship)	Tonaj
ECA	Emission control area	Zonă de control al emisiilor
EEDI	Environmental energy design index	
EEOI	Energy efficiency operational index	Indicele operațional de eficiență energetică
HFO	Heavy fuel oil	Combustibil greu
IMO	International Maritime Organisation	Organizația Maritimă Internațională
LNG	Liquid natural gas	Gaz natural lichid
LPG	Liquid petroleum gas	Gaz petrolier lichefiat
MARPOL	Marine Pollution Convention (IMO)	Convenția internațională pentru prevenirea și reducerea poluării cauzate de nave (IMO)

Contribuții la studiul dinamicii unui sist. de propulsie navală neconvențională

l	Edge lenght	latura de: 5,10, 15 și 20
pala_z [m]	Edge amplitude	amplitudinea mișcărilor verticale ale palei
SOLAS	Safety of Life at Sea Convention (IMO)	Convenția pentru Octrotirea Vieții Omenești pe Mare
teu	Twenty-foot equivalent (container) units	Container 20'
UMC	Constanta Maritime University	Universitatea Maritimă Constanța
$\theta$ [grade]	angle amplitude	amplitudinea mișcărilor unghiulare ale palei
$f_w$ [Hz]	frequency	frecvența mișcărilor unghiulare ale palei
$[\eta]$	efficiency	randament
d [%]	Procentual diferences	Diferențe procentuale

## BIBLIOGRAFIE

- [1] Andriotis, A., Gravaises, M. and Arcoumanis, C., Vortex flow and cavitation in diesel injector nozzles, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol 610, pp195–215, 2008.
- [2] Arcoumanis, C., Bae, C., Crookes, R., Kinoshita, E., The potential of di-methyl ether (DME) as an alternative fuel for compression-ignition engines: A review, *Fuel* 87 pp1014–1030, 2008.
- [3] CIMAC, Guidelines for Ignition and Combustion Quality, CIMAC, 2011.
- [4] Committee on Climate Change, Review of UK Shipping Emissions, 2011.
- [5] DNV, Fuel cells for ships: Research and Innovation, Position, Paper 13, [http://www.dnv.com/binaries/fuel%20cell%20pos paper%20.nal\\_tcm4-525872.pdf](http://www.dnv.com/binaries/fuel%20cell%20pos paper%20.nal_tcm4-525872.pdf), 2012.
- [6] Gaafary M. M., El-Kilani H.S., Moustafa M. M., Optimum design of B-series marine propellers, *Alexandria Engineering Journal*, March 5, 2011.
- [7] Geertsma R. D., Negenborn R. R., Visser K., Hopman J. J., Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments, *Applied energy*, Vol. 194, 15 Mai 2017, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.060>.
- [8] Gonzalez-Adalid J., Perez Sobrino M. et. all, New generation of CLT propellers, *Proceedings of Maritime Technology and Engineering* 3, Londra 2016.

- [9] Greig 2002. Greig, A. *Fuel cells and issues for their use in warships*.
- [10] Groșan V. N., Cercetări privind propulsia cu vele a navelor comerciale – influența sistemelor neconvenționale de propulsie asupra calităților nautice, Teză de doctorat, nepublicată, 2011.
- [11] Grunditz Göran, Quieter, more efficient propellers, Royal Academy of Engineering, <http://www.ingenia.org.uk/Ingenia/Articles/994>, 2015.
- [12] Jakobsen S. B., Fuel Optimisation on 2-Stroke Engines, 3rd Propulsion Conf., Trans IMarEST, London, 2012.
- [13] Jung-Hun Kim, Jung-Eun Choi, Bong-Jun Choi, Seok-Ho Chung and Heung-Won Seo, Development of energy-saving devices for a full slow-speed ship through improving propulsion performance, Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng. (2015) 7:390~398  
<http://dx.doi.org/10.1515/ijnaoe-2015-0027>  
pISSN: 2092-6782, eISSN: 2092-6790, 2015.
- [14] Klimt-Møllenbach C., Green Ship of the Future Project, 3<sup>rd</sup> Ship Propulsion Symposium, Trans IMarEST, [www.greenship.org](http://www.greenship.org), London, 2012.
- [15] Loginow A. W., Stress Corrosion Cracking of Steel in Liquefied Ammonia Service – A Recapitulation,
- [16] Lloyd's Register 2011. Bio-fuel Trials on Seagoing Container Vessel. Maersk-Lloyd's Register-Shell Research Consortium SMIG 09004, Lloyd's Register, July 2011.
- [17] MacKay D., Sustainable Energy-Without the Hot Air, ISBN 078-0-9544529-3-3, 2009.

- [18] MacKay D, Lecture to the Royal Academy of Engineering's Working Group, 2011.
- [19] Nita C.M., Bocanete P., Scurtu I.C., Experimental methods for determining the characteristic quantities of unconventional naval propellers, Tehniun, Vol. 4, nr. 8, pp. 56-63, 2022.
- [20] Nita C., Buzbuchi N., The current state and the impact of the use of unconventional energies in the international energy context, Scientific Bulletin „Mircea cel Batran” Naval Academy, Vol. 21, Issue 2, pp. 1-14, 2018.
- [21] Papanikolaou A., Zaraphonitis G., Bitner-Gregersen E., Shigunov V., El Moctar O., Guedes Soares C., Reddy D. N., Sprenger F., Energy efficient safe ship operation (SHOPERA), Transportation Research Procedia 14 820 – 829, 6th Transport Research Arena April 18-21, 2016.
- [22] Pérez-Sobrino M. , González-Adalid J., Ramón Quereda, Cristina Soriano, Amadeo Morán, Giulio Gennaro, Scale effects in open water test results for performance prediction of conventional and unconventional propellers, <https://sectormaritimo.es/5-01scale-effects-in-open-water-test-results>.
- [23] Royal Academy of Engineering, Synthetic Biology: scope, applications and implications, The Royal Academy of Engineering, London, May 2009.
- [24] Royal Academy of Engineering, Future ship powering options. Exploring alternative methods of ship propulsion, ISBN: 978-1-909327-01, London, 2013.

- [25] Sinha Tanumoy, 10 Factors Considered For Efficient Ship Propeller Design, 2017, <https://www.marineinsight.com/naval-architecture>, accesat 10.11.2017.
- [26] TICA, Turbine Inlet Cooling Association, <http://turbineinletcooling.org/intro.html>, 2012.
- [27] Veldhuis, I., Application of Hydrogen Marine Systems in High-speed sea container transport, Eng. D Thesis, University of Southampton. <http://eprints.soton>, 2007.
- [28] Vincent Daniello Capt., Improving Propeller Efficiency, <https://www.boatingmag.com/improving-propeller-efficiency>, january 18, 2017.
- [29] Wilson T., Trans IMarEST, 3rd Ship Propulsion Conference, London, November 2012.
- [30] <https://www.wartsila.com/>, accesat la 31.07.2017.
- [31] [http://www.avicenne.com/index\\_global\\_en.php#&panel1-1](http://www.avicenne.com/index_global_en.php#&panel1-1), accesat la 10.11.2017.
- [32] <https://www.marineinsight.com/green-shiping/top-7-green-ship-concepts-using-wind-energy/>, accesat 10.11.2017.
- [33] [https://www.researchgate.net/figure/Figure-5-Anton-Flettners-first-rotor-ship-the-Baden-Baden-crossed-the-Atlantic-in-1926\\_23223631\\_fig2.](https://www.researchgate.net/figure/Figure-5-Anton-Flettners-first-rotor-ship-the-Baden-Baden-crossed-the-Atlantic-in-1926_23223631_fig2.), accesat 30.11.2017.
- [34] <http://www.world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/transport/nuclear-powered-ships.aspx>, accesat 20.10.2017.
- [35] *Amorăriței M.*, Tehnologii de montare a instalațiilor navale, Îndrumar lucrări practice, 2004.
- [36] *Amorăriței M.*, Complemente de hidrodinamica

elicele navale în curent neuniform, Editura Galați University Press, 2008.

- [37] *Chiotoroiu L., Hreniuc V.*, Teoria și construcția navei. Îndrumar de proiectare, Ediția a II-a, Editura Nautica, Constanța, 2004.
- [38] *Feiyang Z., Wenming Y., Woei W.T., Siaw K.C., Wenbin Y.*, An Overall Ship Propulsion Model for Fuel Efficiency Study, The 7th International Conference on Applied Energy – ICAE2015, p. 813 – 818, 2015.
- [39] *Geertsma R.D., Negenborn R.R., Visser K., Hopman J.J.*, Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments, Applied energy, Elsevier Journal, 2016.
- [40] *Groșan V.N.*, Cercetări privind propulsia cu vele a navelor comerciale - influența sistemelor neconvenționale de propulsie asupra calităților nautice, Teză de doctorat, nepublicată, 2011.
- [41] *Horiuchi* Presentation animation secondry.ppt, Japan programmet ved NTNU Japan Seminar on Shipping Between Japan and Norway, 2013.
- [42] *Liu Yun, Zhao Si-yuan, Tu Shan-chao, Zhu Tian-yu, Li Rong-xiang*, Bionic Propulsion on Water and Measurement of Propulsion, International Conference on Solid State Devices and Materials Science, 2012.
- [43] *Maier V.*, Mecanica și construcția navei, Vol I, Editura Tehnică, București, 1987.
- [44] *Maier V.*, Mecanica și construcția navei, Vol II, Editura Tehnică, București, 1988.
- [45] *Manoliu I.A.*, Nave și Navigație, Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1984.



- [46] *O'Rourke R.*, Navy Ship Propulsion Technologies: Options for Reducing Oil Use -- Background for Congress, Congressional Research Service Report for Congress, Washington DC, June 2006.
- [47] *Rawson K.J., Tupper E.C.*, Basic ship theory, Fifth edition, Butterworth-Heinemann Publishing, Oxford, 2001.
- [48] *Sgrumală M., Bidoae I.*, Proiectarea si construcția navelor mici. Editura Tehnică, București, 1978.