



UNIVERSITATEA MARITIMĂ CONSTANȚA
ȘCOALA DOCTORALĂ: INGINERIE MECANICĂ ȘI MECATRONICĂ

REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT

*CONTRIBUȚII LA STUDIUL INTERACȚIUNII DINTRE
MIȘCAREA SUPRAFEȚELOR LIBERE LICHIDE ȘI
MIȘCĂRILE NAVEI ÎN CONDIȚII DE VAL LA NAVELE TIP
VRACHIER*

*CONTRIBUTIONS TO THE STUDY OF THE INTERACTION
BETWEEN MOTION OF FREE FLUID SURFACES AND
SHIP MOTIONS IN MARINE WAVE ENVIRONMENT FOR
BULK CARRIERS*

Autor: *Ing. Marinel-Dănuț LAMBĂ*

Conducător de doctorat: *Prof. Univ. Dr. Ing. Mihael CHIRCOR*

CONSTANȚA
2017

CUPRINS

1. INTRODUCERE	5-7
1.1 Necesitatea și oportunitatea lucrării	5-7
1.2 Obiectivele tezei	5-10
1.3 Organizarea tezei	6-10
 2. STADIUL ACTUAL PRIVIND TRANSPORTUL MARITIM AL MĂRFURILOR ÎN VRAC	 7-13
2.1 Evoluția transportului maritim al mărfurilor în vrac	7-13
2.1.1 Principalele tipuri de mărfuri transportate în vrac	7-14
2.1.2 Clasificarea navelor de tip vrachier	18
2.2 Elemente structurale și de construcție la navele vrachier	7-26
2.2.1 Structuri de compartimentare	7-26
2.2.2 Structuri funcționale	29
2.2.3 Spațiile de marfă	8-31
2.3 Caracteristici de exploatare a navelor tip vrachier destinate transportului mărfurilor în vrac	8-32
2.3.1 Operarea navei vrachier în balast	32
2.3.2 Operarea navei vrachier în condiții de încărcare	8-37
2.4 Tendințe de viitor în construcția navelor vrachier	41
2.4.1 Noul concept de navă vrachier din clasa handysize	41
2.4.2 Prima navă vrachier specializată în transportul minereului de nichel	42
2.5 Concluzii Capitolul 2	8-44
 3. SIMULAREA NUMERICĂ A EFECTULUI SUPRAFEȚELOR LIBERE LICHIDE LA BORD - ETAPA 1	 9-47
3.1 Sisteme cuplate - Stabilitatea soluțiilor și precizia	9-47
3.1.1 Concepte introductive	9-47
3.1.2 Tratamentul cu partiții	51
3.1.3 Introducere în analiza stabilității soluțiilor	53
3.2 Generarea modelului geometric	9-53
3.3 Studiul mișcării navei tip vrachier sub acțiunea valurilor	11-55
3.3.1 Elemente introductive	11-55
3.3.2 Modelul în CFX	12-58
3.4 Analiza rezultatelor	15-64
3.4.1 Graficele punctelor de monitorare	15-64
3.4.2 Parametri de curgere calculați pentru chila navei vrachier	16-66
3.4.3 Parametri de curgere calculați pentru Peretele mișcător	67
3.4.4 Parametri de curgere calculați pentru frontiera Sym (planul de simetrie)	17-69
3.4.5 Parametri de curgere calculați pentru zona de interfață	18-70
3.5 Concluzii Capitolul 3	19-72

4. SIMULAREA NUMERICĂ A EFECTULUI SUPRAFEȚELOR LIBERE LICHIDE LA BORD - ETAPA 2	19-73
4.1 Introducere	19-73
4.2 Modelul matematic	20-74
4.3 Bazele teoretice ale modelării cu elemente și volume finite ale fenomenului de sloshing	76
4.3.1 Definirea problemei	76
4.3.2 Modelarea peretelui tancului cu elemente finite tip „shell”	77
4.3.3 Modelarea cu volume finite a domeniului fluidului	82
4.4 Simularea cu elemente și volume finite a efectului de sloshing la nava tip vrachier considerată	21-89
4.4.1 Strategia simulării numerice	21-89
4.4.2 Modelul Geometric (CAD)	22-90
4.4.3 Analiza numerică cu Ansys CFX	24-91
4.4.3.1 Datele de intrare ale modelului numeric CFD	24-91
4.4.4 Scenariul 1- Toate magaziile de marfă balastate 50%	27-95
4.4.5 Analiza numerică cu Ansys Modulul structural Scenariul 1	29-102
4.4.5.1 Datele de intrare în simulare	29-102
4.4.5.2 Rezultate simulare structurală	32-104
4.4.6 Scenariul 2- Magaziile de marfă 1-3-5 încărcate cu 50% bauxită	34-107
4.4.7 Analiza numerică cu Ansys Modulul structural Scenariul 2	38-113
4.4.7.1 Datele de intrare în simulare	38-113
4.4.7.2 Rezultate simulare structurală	38-114
4.4.8 Scenariul 3- Magaziile de marfă 2-4 încărcate cu 65% bauxită	41-117
4.4.9 Analiza numerică cu Ansys Modulul structural Scenariul 3	43-122
4.4.9.1 Datele de intrare în simulare	43-122
4.4.9.2 Rezultate simulare structurală	43-122
4.5 Concluzii Capitolul 4	45-125
5. VALIDARE CALITATIVĂ A MODELELOR	45-127
5.1 CFD versus Testele pe modele la scară redusă	45-127
5.2 Validarea calitativă	46-129
5.3 Concluzii Capitolul 5	50-145
6. CONCLUZII FINALE	50-147
7. CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI RECOMANDĂRI PENTRU LUCRĂRILE VIITOARE	51-151
7.1 Contribuții personale	51-151
7.2 Recomandări pentru lucrările viitoare	52-152
BIBLIOGRAFIE	53-155

1. INTRODUCERE

1.1 Necesitatea și oportunitatea tezei

Cercetarea științifică prezintă aspecte foarte importante ale procesului de lichefiere a mărfurilor în vrac transportate la bordul navelor comerciale care pot duce la pierderea stabilității intacte a vrachierelor, cu consecințe grave asupra siguranței lor și a echipajului.[146]

Pe lângă metodele practice, pentru evaluarea la bordul navei, a posibilei stări de lichefiere a mărfurilor în vrac, recomandate de Codurile Maritime Internaționale privind Transportul Mărfurilor, care reglementează transportul acestor mărfuri, lucrarea prezintă o posibilă metodă de determinare a momentului de înclinare al navei datorat lichefierii mărfurilor, dar și probabilitatea deplasării mărfurilor datorată procesului de lichefiere.[147][149]

În ultimii ani, un număr crescut de nave și-a pierdut stabilitatea intactă datorită lichefierii de marfă. O parte dintre ele au dezvoltat unghiuri mari de canarisire în timp ce altele, din păcate, au fost răsturnate.[45][144][151][152]

În domeniul analizei fenomenului de „sloshing” s-au scris multe lucrări până acum mai cu seamă în domeniul marin. Una dintre principalele îngrijorări generate de acest fenomen este încărcarea de tip impuls dată de masele mari de lichid în mișcare din magazii/tancurile navelor maritime asupra structurii navei care pot produce deformații structurale asupra pereților acestora. Asemenea deformații structurale datorate sloshingului au fost raportate mai cu seamă în cazul tancurilor petroliere și a navelor LNG.[19][25][26] [36][66][67][75][149][152][153]

În anii 1950-1960 studii experimentale și analitice au fost conduse pentru nave spațiale tip rachete, iar în 1970-1980 această problemă a fost adresată în cazul navelor LNG. Începând cu anul 1980 odată cu apariția metodelor de analiză cu elemente finite, aceste fenomene au început să fie studiate de către cercetători.

Lucrarea de față vine în continuarea acestui trend de implicarea analizei cu elemente finite în analiza acestui fenomen dăunător asupra structurii unei nave tip vrachier.

1.2 Obiectivele tezei

Ca și obiective teza urmărește:

- Prezentarea stadiului actual privind transportul maritim al produselor în vrac.
- Simularea comportamentului dinamic al unei nave tip vrachier sub influența factorilor externi de mediu marin.
- Generarea geometriei magaziiilor de marfă a unui vrachier folosind programul SolidWorks.
- Folosind cele două elemente de mai sus se simulează cu programul ANSYS comportamentul a cinci magazine de marfă sub diverse scenarii de încărcare și fluide (marfă sau apă de mare).

1.3 Organizarea tezei

Teza de doctorat „**Contribuții la studiul interacțiunii dintre mișcarea suprafețelor libere lichide și mișcările navei în condiții de val la navele tip vrachier**” se desfășoară astfel: Stadiul documentar și Cercetări experimentale și modelări numerice, care este obiectivul principal al tezei de doctorat, iar pentru atingerea obiectivelor propuse, teza a fost structurată pe 6 capitole, prin care să se pună în evidență valoarea demersului științific.

Prima parte este realizată pe aproximativ o treime din teză și cuprinde două capitole astfel: primul capitol are menirea de a introduce cititorul în subiectul tezei, iar apoi a fost realizat Studiul actual în transportul maritim al produselor în vrac, care detaliază evoluția transportului pe mare al produselor în vrac, elemente structurale și de construcție la navele vrachier, caracteristici de exploatare a navelor tip vrachier destinate transportului mărfurilor în vrac și tendințe de viitor în construcția navelor vrachier.

A doua parte cuprinde cercetările experimentale Simularea numerică a efectului suprafețelor libere lichide la bord- etapa 1- constă în modelarea geometrică (CAD) și analiza numerică cu Ansys CFX și etapa 2- constă în simularea numerică a efectului suprafețelor libere lichide la bordul navei, realizându-se un număr de trei scenarii în acest sens. În stabilirea parametrilor folosiți pentru simulare s-a considerat faptul că pe timpul apariției fenomenului de sloshing, magaziile navei vrachier sunt balastate sau încărcate la diferite valori. Validare calitativă a modelelor și CFD versus Testele pe modele la scară redusă, iar pentru validarea experimentală a tehnicii de modelare și a modelului numeric a fost folosit un model de tanc 3D de forma paralelipipedică cu dimensiunile: 5x4,5x3m. Simularea numerică s-a realizat cu ajutorul softului ANSYS Fluent. Utilizarea ANSYS Structural cu date de intrare din datele de ieșire CFD pentru calculul comportamentului structural al tancului și al magaziiilor de marfă al navei tip vrachier. Rezultatele simulării experimentale au scos în evidență că sloshingul este un fenomen dinamic care poate fi studiat folosind simulările dinamice ale pachetului CFD ANSYS Fluent, demonstrându-se puterea CFD de a simula cu acuratețe evoluția fenomenului de sloshing în tancuri sau magaziile de marfă ale navei tip vrachier, iar deformările structurii tancului și vrachierului supuse fenomenului de sloshing au fost capturate utilizând ANSYS și apoi concluziile parțiale. Urmează concluziile finale, iar contribuțiile personale și recomandările pentru lucrările viitoare fac subiectul ultimului capitol.

Contribuțiile personale se referă la modelarea analitică, la analiza modală și analiza cu elemente finite aplicate în hidrodinamică a navei în mediul cu apă, la realizarea unui model complex 3D al pereților navei tip vrachier prin modelarea cu volume finite cu scopul de a scoate în evidență comportarea acestor pereți când la bordul navei vrachier apare efectul de sloshing datorat suprafețelor libere lichide din magaziile de marfă ale navei și am realizat un studiu amplu privind răspunsul structural al pereților transversali ai magaziiilor/hambarelor de marfă datorită impactului suprafețelor libere lichide, ceea ce presupune două treimi din teză.

Lucrarea se încheie cu reperele bibliografice utilizate.

2. STADIUL ACTUAL PRIVIND TRANSPORTUL MARITIM AL MĂRFURILOR ÎN VRAC

2.1 Evoluția transportului maritim al mărfurilor în vrac

În industria de transport maritim, o marfă vrac este o substanță care se comercializează în cantități mari și a cărei caracteristici fizice o fac ușor de manevrat și de transportat în vrac. Transportul în vrac al mărfurilor este o practică veche în transportul maritim.[27]

Prin definiție, navele de tip vrachier, sunt destinate în principal transportului de mărfuri în vrac. Acest tip de marfă este, în general uniform în compoziție și se încarcă direct din zonele de marfă fără nici o altă formă intermediară de depozitare. În cadrul acestui capitol de cercetare științifică se vor aborda aspectele ce țin de evoluția constructivă și operativă a navelor vrachier, pornind cu un scurt istoric al dezvoltării transportului maritim de mărfuri în vrac, dezvoltând ulterior problemele ce țin de caracteristicile constructive ale acestor nave, condițiile impuse și recomandate de operare în condiții de balast și încărcare cu marfă și încheind cu o prezentare a viitorului în domeniu, atât din punct de vedere constructiv, cât și al altor cerințe apărute în ultima perioadă.

2.1.1 Principalele tipuri de mărfuri transportate în vrac

Cărbunele este printre principalele mărfuri transportate de navele vrachier.

Cimentul este caracterizat de particule cu dimensiunea de 0,1 mm. În cazul cimentului, atât gravitatea specifică, cât și unghiul de răspuns sunt dependente de cantitatea de aer din marfă.

Bauxita a fost, și rămâne principalul minereu extras pe plan mondial. Aproape întreaga cantitate de bauxită extrasă se utilizează în procesul de producere al aluminiului.

Cerealele prezintă unele particularități nefavorabile transportului pe mare, punând în pericol nava și echipajele.

2.2 Elemente structurale și de construcție la navele vrachier

2.2.1 Structuri de compartimentare

La navele de ultimă generație se pot întâlni și pereți despărțitori realizați din materiale compozite, ce nu necesită adăugarea de elemente de fixare și rigidizare. Scopul utilizării acestui tip de pereți este cel de a obține o bună rezistență a navei și o reducere a greutateii acesteia.

Pereții gofrați sunt utilizați la navele moderne, în special la navele mari construite în sistem de osatură longitudinal și combinat.

2.2.3 Spațiile de marfă

În mod uzual, spațiile (magaziile/hambarele) de marfă ale unei nave vrachier sunt concepute structural pentru a permite transportul unor volume mari de mărfuri. Marfa transportată trebuie să fie încărcată și descărcată cu ajutorul macaralelor sau a instalațiilor de sucțiune, ceea ce necesită existența unor deschideri

ample a gurilor magaziiilor de marfă pe durata operării. Datorită greutatei mărfii încărcate, structura trebuie concepută pentru a rezista la presiunea statică ridicată ce acționează asupra corpului navei vrachier, cum ar fi greutatea structurală a navei, greutatea mărfii și a balastului și presiunea hidrostatică exercitată de mediul lichid în care operează nava. Gurile magaziiilor de marfă trebuie să fie consolidate împotriva forțelor de forfecare, și împotriva loviturilor accidentale ce pot apărea pe durata încărcării sau descărcării.

2.3 Caracteristici de exploatare a navelor tip vrachier destinate transportului mărfurilor în vrac

2.3.2 Operarea navei vrachier în condiții de încărcare

Nava tip vrachier care navigă în condiții de val, cu valurile din travers este supusă unor mișcări ample de ruluu, iar acest fapt poate fi rezultatul drumului pe care trebuie să îl urmeze nava vrachier sau datorită pierderii mașini principale. Astfel de mișcări ample de ruluu pot conduce direct la avariarea corpului navei vrachier și a suprastructurilor și poate cauza chiar și deplasarea mărfii, fapt ce poate conduce la avariarea navei tip vrachier și pierderea stabilității. Datorită mișcării violente de ruluu plăcile de bordaj sunt supuse în mod repetat variației de presiune din partea apei de mare ce acționează asupra lor. Pe termen lung, acest fenomen poate duce la slăbirea plăcii de bordaj și a structurii de care este aceasta atașată. Sloshingul este o mișcare violentă a lichidului, în interiorul unui compartiment, ca rezultat al mișcării navei vrachier, în condiții de mare liberă. Dacă nava vrachier a suferit o inundare există pericolul ca mișcarea apei de inundare să provoace distrugerea pereților despărțitori etanși, permițând inundarea compartimentelor adiacente.

2.5 Concluzii Capitolul 2

Din punct de vedere constructiv și operațional, ultimii ani au fost marcați de numeroase cerințe referitoare la criteriile privind stabilitatea de avarie pe care trebuie să le îndeplinească o navă vrachier, referitoare la rezistența structurală a acestor nave, caracteristicile structurilor de despărțire a magaziiile/hambarele de marfă, și utilizarea de noi structuri, mai ușoare, dar cu aceeași rezistență, precum și cerințe referitoare la detectarea nivelului de apă în magaziiile/hambare mărfii, balastului și în spațiile cu o altă destinație.

Problematica prezenței apei în spațiile (magaziile/hambarele) de marfă trebuie abordată din două puncte de vedere în cazul navelor vrachier. Astfel prima abordare este când apa din magazine se datorează inundării accidentale a acestora sau datorită umidității din marfă transportată, care poate produce lichefierea mărfii, și duce la scăderea considerabilă a stabilității navei vrachier, iar cea de a doua abordare este cea în care apa este încărcată în magaziiile de marfă în vederea satisfacerii cerințelor de stabilitate ale navei vrachier.

Indiferent de condiția prin care apa se găsește în magaziiile de marfă ale navei vrachier, aceasta ridică anumite probleme, cum ar fi efectul asupra structurilor învecinate, a rezistenței structurale a corpului navei vrachier și influența asupra stabilității intacte a navei tip vrachier.

3. SIMULAREA NUMERICĂ A EFECTULUI SUPRAFEȚELOR LIBERE LICHIDE LA BORD- ETAPA 1

3.1 Sisteme cuplate-Stabilitatea soluțiilor și precizia

3.1.1 Concepte introductive

În cele ce urmează se trece la simularea numerică a Efectului suprafețelor libere lichide de la bord asupra stabilității structurii navei tip vrachier. Instrumentul numeric folosit va fi Interacțiunea dintre fluid și structură. Apa mării va acționa prin intermediul valurilor asupra structurii navei vrachier, care la rândul ei va acționa asupra încărcăturii care poate fi un fluid (sau asimilat unui fluid) și care fluid va reacționa asupra pereților magaziiilor de marfă (generând fenomenul de sloshing). Așadar acest tip de interacțiune va guverna toate fenomenele legate de subiectul cercetării noastre.

3.2 Generarea modelului geometric

Ca în orice cercetare se pleacă de la un model real fără a se pierde însă, din gradul, de generalitate al cercetării. Nava aleasă pentru cercetarea noastră este o navă tip vrachier cu următoarele caracteristici:

- Lungime = 290 m
- Lățime = 32 m
- Pescaj = 11,1 m
- Deadweight = 57.700 t
- Motor MAN B&W 6S50MC = 8.200 kw
- Grosime tablă oțel = 22 mm.

Desenul acestei nave tip vrachier și folosind SolidWorks 2014 s-a generat modelul geometric CAD al navei vrachier astfel prezentat în figura 3.8.

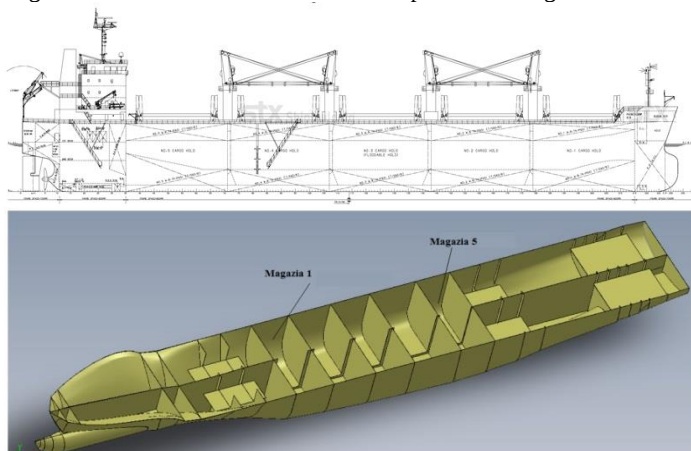


Figura 3.8 Planul și modelul geometric CAD al navei vrachier aleasă pentru studiu

Trebuie din capul locului menționat că simularea numerică ce urmează implică un grad ridicat de complexitate având nevoie de resurse de calcul substanțiale la nivel de computer, ca atare se va profita de proprietatea de simetrie a navei tip vrachier, drept care se va modela numeric doar jumătate din navă, pentru a se face economie de resurse.

Pentru o jumătate de navă tip vrachier caracteristicile geometrice ale modelului CAD sunt:

- Densitate material corp navă (Oțel) = 7800.0000 kg/m^3
- Masă = 29212771.5516 kg
- Volum = 3745.2271 m^3
- Arie suprafață = 102516.6000 m^2
- Centru greutate [m]:
X = 155.3927
Y = 17.6088
Z = -11.9597
- Momente de inerție calculate [kg/m^3]:
Ixx = 16830893681.8206
Ixy = 155000920198.2467
Ixz = -104240912271.1265
Iyx = 155000920198.2467
Iyy = 2751913141157.2334
Iyz = -6430523122.9927
Izx = -104240912271.1265
Izy = -6430523122.9927
Izz = 2756311538962.6108

Cazurile de simulare vor fi după cum urmează:

- Numerotarea magaziiilor de marfă din prova (partea din față) la pupa (partea din spate): 1-5.
- Marfă: Bauxită, densitate = $3,2 \text{ t/m}^3$; vâscozitate = 11,70 cSt.
- Cazul 1
- Toate magaziiile de marfă balastate 50%
- Cazul 2
Marfă în magaziiile vrachierului, astfel:
 - magaziiile de marfă: 2 și 4 = 65%
 - magaziiile de marfă: 1, 3, 5 = 50%

Simularea va cuprinde două etape:

Mai întâi considerându-se doar chila navei tip vrachier pe jumătate cu întreaga masă concentrată în centrul de greutate și cu momentele de inerție specificate, se va studia mișcările acesteia, în două grade de libertate și anume pe verticală (heave) pe axa Oz și tangajul în jurul axei Oy. Studiul se va efectua pe un model la scara 1:50 într-un domeniu de fluid, care simulează valurile mării. Acțiunea și reacțiunea dintre valuri și chila navei tip vrachier se va studia prin interacțiunea fluid-structură pe softul ANSYS 13. Rezultatul acestui studiu va fi o diagramă de mișcare pe verticală a centrului de greutate și diagrama tangajului la diferiți pași de timp.

Cu datele de intrare din diagrama de mai sus se va modela în detaliu nava tip vrachier sub scenariile precizate urmărindu-se interacțiunea dintre navă-marfă-navă.

3.3 Studiul mișcării navei tip vrachier sub acțiunea valurilor

3.3.1 Elemente introductive

Ansys CFX va utiliza în această simulare opțiunea Beta care permite calculul direct al mișcării chilei navei tip vrachier asimilată unui corp rigid cu întreaga masă concentrată în centrul de greutate. Noțiunea de Corp Rigid va delimita un subdomeniu al domeniului fluid căruia i se va putea calcula mișcarea impunându-i-se diverse restricții de mișcare, de pildă în cazul nostru chila vrachierului va putea să se miște doar în plan vertical și i se va permite doar o rotație în jurul axei Oy.

Pentru a se modela atmosfera, apa mării și interfața dintre ele, se va apela la opțiunea modelării multifazice, la care deasupra chilei vrachierului există aerul atmosferic, iar sub chilă apa mării.

Există cazuri precum cel al nostru, în care două faze continue una gazoasă și alta lichidă, sunt separate de o interfață distinctă care este în fapt suprafața mării. Între cele două faze în abordarea omogenă se poate presupune, că ambele se mișcă cu aceeași viteză, ipoteză care poate fi rezonabilă în cazul de față de vreme ce viteza vântului are o influență mult mai mică asupra mișcării navei vrachier în comparație cu efectele valurilor.

Pentru generarea valurilor se va considera conceptul Peretelui care se mișcă (Moving wall sau Flapper) care vor interacționa cu chila navei tip vrachier.

Modelul considerat la scara 1:50 este cuprins într-un domeniu paralelipipedic (ca într-un tanc de testare) la care unul dintre pereți se consideră a fi planul de simetrie. Chila navei vrachier este astfel poziționată încât să ofere suficient spațiu în fața și în spatele ei pentru dezvoltarea valurilor generate de „Flapper”; domeniul fluid este deschis la ieșirea din tancul de testare, dar și la partea superioară care este atmosfera. La partea din față a chilei vrachierului (la prova lui) se simulează Peretele mișcător, iar lateralele tancului sunt modelate ca fiind pereți rigizi, așa cum se vede în figura de mai jos.



Figura 3.11 Schema condițiilor la frontieră

3.3.2 Modelul în CFX

Modelul rezultat în CFX este dat în figura de mai jos:

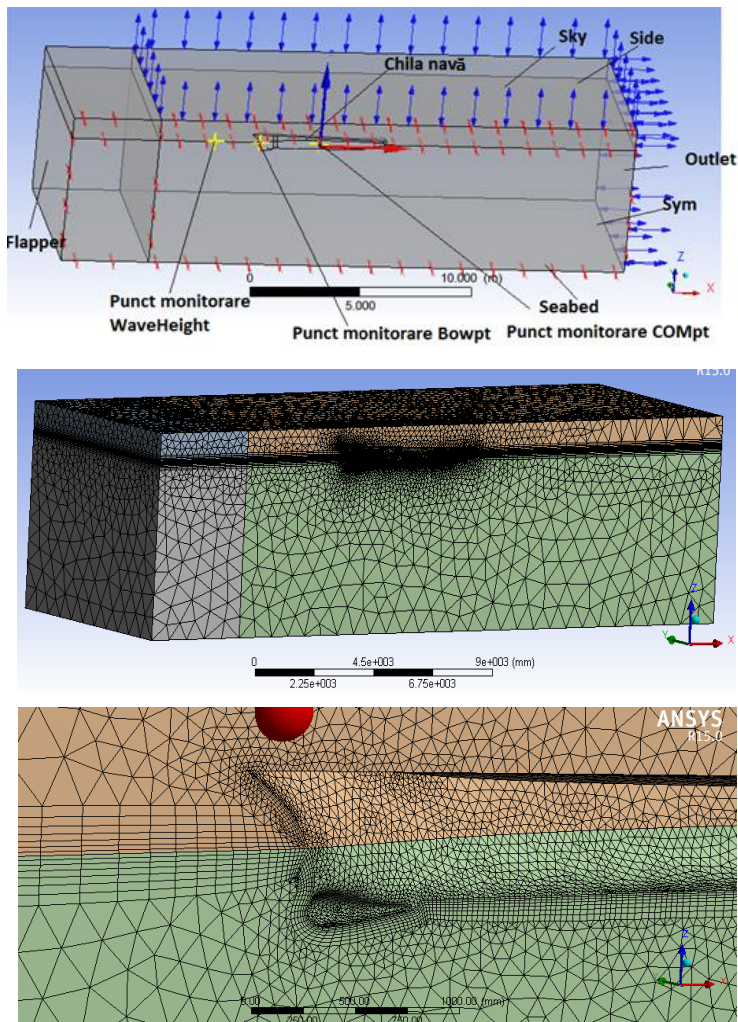


Figura 3.12 Modelul CFX

Se disting trei puncte de monitorare care măsoară deplasarea totală a rețelei de volume finite pe verticală (axa Oz):

- WaveHeight este așezat în fața puplei navei tip vrachier și măsoară înălțimea valului generat de Peretele mișcător.

- Bowpt monitorizează deplasarea pe verticală a unui punct aflat la pupa navei tip vrachier.
- COMpt monitorizează deplasarea pe verticală a Centrului de masă a chilei vrachierului.
- Suplimentar se calculează Tangajul (aproximativ) al navei tip vrachier derivat din Bowpt și COMpt astfel:

$$\text{appxPitch} = \text{atan2}(\text{probe}(\text{Total Mesh Displacement Z}) @ \text{Bowpt} - \text{probe}(\text{Total Mesh Displacement Z}) @ \text{COMpt}, 2.49[\text{m}])$$

Modul de generare a rețelei de volume finite este redat în figura de mai jos:

S-au folosit elemente prismatice care să surprindă cu precizie gradientii parametrilor de curgere în zona chilei navei tip vrachier, dar sunt astfel generate încât să asigure și o precizie pe verticală mai cu seamă în zona interfeței unde s-a procedat la Inflația rețelei în straturi suprapuse și descrescătoare ca grosime către interfață. Pentru redarea în amănunt a condițiilor la frontiere se atașează tabelele de mai jos (redate în engleză conform Raportului Ansys generat):

Domeniu	Noduri	Elemente finite
HullDomain	127147	420654

Tabelul 3.1 Rețeaua de elemente finite CFX

Domeniu - HullDomain	
Tip	Fluid
Locație	Assembly
Materiale	
Aer la 25 C	
Definiție fluid	Material Library
Morfologie	Continuous Fluid
Apă	
Definiție fluid	Material Library
Morfologie	Continuous Fluid
Setări	
Model flotabilitate	Buoyant
Densitate flotabilitate referință	1.1850e+00 [kg m ⁻³]
Componenta X a gravitației	0.0000e+00 [m s ⁻²]
Componenta Y a gravitației	0.0000e+00 [m s ⁻²]
Componenta Z a gravitației	-g
Buoyancy Reference	Automatic

Location	
Mișcarea domeniului	Stationary
Deformație rețea de EF	Regions of Motion Specified
Mișcare relativă la	Previous Mesh
Model mișcare rețea EF	Displacement Diffusion
Rigiditate rețea FE	Value
Rigiditate rețea FE	$1[m^4 s^{-1}]/\max(0.05[m], \text{Water.Wall Distance})^2$
Presiune de referință	1.0000e+00 [atm]
Model propagare căldură	Isothermal
Temperatură fluid	2.5000e+01 [C]
Model omogen	True
Model turbulență	SST
Funcție perete turbulență	Automatic

Tabelul 3.2 Domeniul fizic al CFX

Simularea se face în condiții de tranzient din 0,1 în 0,1 secunde în intervalul de timp de la zero la 10 secunde. Se pot face câteva precizări după cum urmează:

- Sunt folosite ca materiale Aer și Apă incompresibile cu opțiunea Multifazică Omogenă și cu interfața de tip Standard.
- Flotabilitatea se raportează la o densitate minimă egală cu cea a aerului.
- Se impune Rețelei de volume finite în mișcare o rigiditate egală cu expresia (în limbaj programare CCL din ANSYS):

$$\text{Mesh Stiffness} = 1[m^4 s^{-1}]/\max(0.05[m], \text{Water.Wall Distance})^2$$

- Frontiera Sky care corespunde tipului de frontieră „Opening” cu presiunea statică zero.
- Frontiera „Outlet” este similară cu Sky cu diferența că presiunea statică variază pe verticală după expresia:

$$\text{hypres} \approx \Delta\rho \times g \times h$$

unde $\Delta\rho$ este densitatea apei relativ la densitatea minimă de flotabilitate de referință a aerului.

- Frontiera Flapper are impusă o mișcare de-a lungul axei Ox care să genereze valuri dată de expresia:

$$X \text{ Component} = \text{FlapPos} \times (z - \text{bedh}) / \text{meandepth}$$

$$\text{FlapPos} = \text{wavelen} \times 0.5 \times 0.1 \times (1.0 - \cos(\text{womeg} \times t))$$

$$\text{womeg} = \sqrt{g \times \text{wavnum} \times \tanh(\text{wavnum} \times \text{meandepth})}$$

care înseamnă că deplasarea peretelui mișcător variază liniar de la fundul tancului de testare spre suprafața apei, cu o variație sinusoidală de o frecvență derivată din ecuația dispersiei. Această mișcare va genera valuri de suprafață.

3.4 Analiza rezultatelor

3.4.1 Graficele punctelor de monitorare

După executarea celor 10 pe secundă x10 secunde x5 iterații pe pasul de timp=500 de iterații, programul ridică automat graficele punctelor de monitorare așa cum se vede mai sus.

Se pot distinge două zone și anume: o zona tranzitorie în care punctele de monitorare descriu o traiectorie oarecum aleatorie și o zona la care forma sinusoidală a valului descrisă de punctul WaveHeight devine vizibilă. Se poate decide ca pentru Etapa 2 de simulare să se ia tabelar valorile calculate între pașii de timp 60 și 80 pentru COMpt (curba de culoare verde pe grafic) corespunzător mișcării pe verticală a centrului de masă (x 50) și tangajul appxPitch de culoare orange.

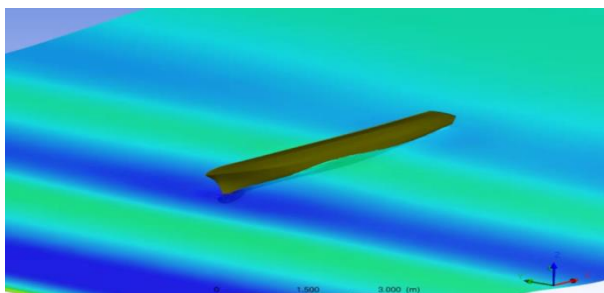
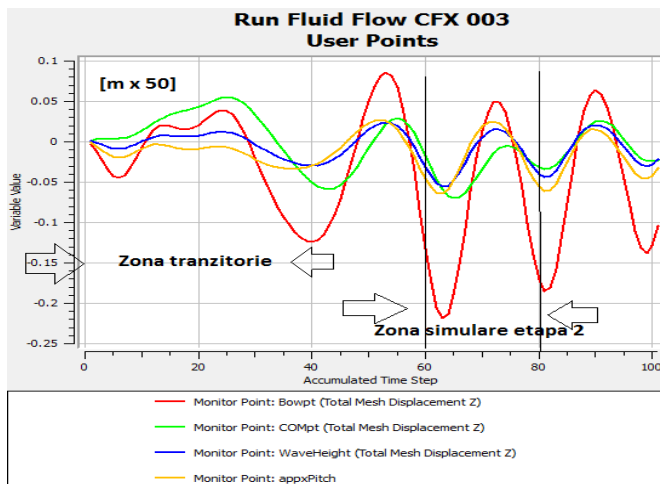


Figura 3.13 Grafic mișcare și Mișcarea navei tip vrachier-Animație disponibilă

Prin oglindirea față de planul de simetrie se poate vedea comportarea chilei vrachierului sub valuri fiind disponibilă și o animație în acest sens.

3.4.2 Parametri de curgere calculați pentru chila navei vrachier

Deși de interes pentru etapa 2 este doar graficul arătat mai sus, este totuși bine să se analizeze și alți parametri calculați pentru diversele zone ale domeniului de calcul, începând bineînțeles cu chila navei tip vrachier.

Se prezintă doar rezultatele corespunzătoare ultimului pas de calcul, și anume la timpul final $t=10$ secunde=Pasul de timp 100.

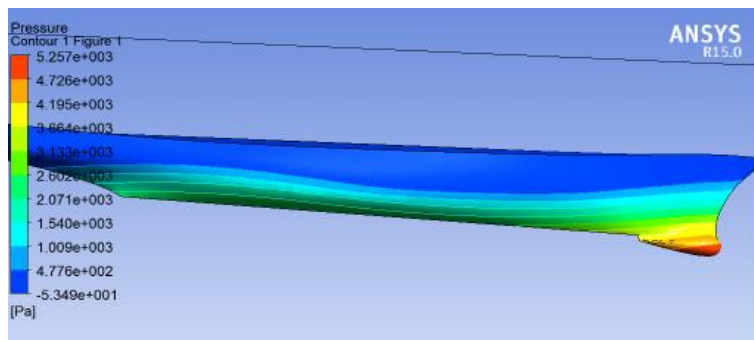


Figura 3.14 Distribuția câmpurilor de presiuni

În figura de mai sus se poate vedea distribuția câmpurilor de presiuni exercitate de val asupra chilei vrachierului, cu un maxim de 5257 Pa la nivelul bompresului.

De reținut că aceste valori și toate valorile care urmează, sunt calculate pentru modelul la scara 1:50, iar extrapolarea la nava la scară reală se poate face conform teoriilor de echivalență ale lui Froude (1874)[53]. Cum aceste aspecte sunt dincolo de obiectivele acestei lucrări, nu se insistă asupra lor.

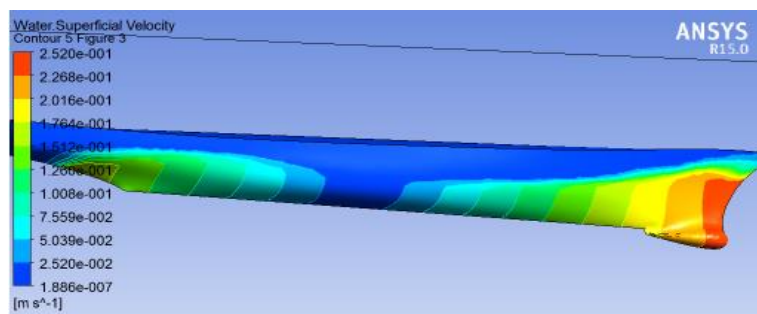


Figura 3.15 Viteza apei de-a lungul chilei

Viteza apei de-a lungul chilei vrachierului este distribuită așa cum se vede în figura de mai sus, cu un maxim la prova de 0,25 m/s, cu o zonă de stagnare la partea de mijloc a chilei vrachierului și cu o ușoară accelerare spre pupa.

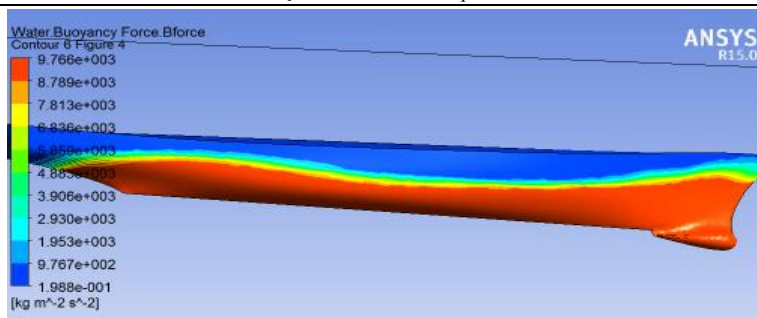


Figura 3.16 Flotația

Forța de flotație calculată exercitată asupra chilei vrachierului de către apă se exercită aproape uniform cu o valoare maximă de 9766 kg/m²s² urmărind forma valului la nivelul interfeței apă-aer.

3.4.4 Parametri de curgere calculați pentru frontiera Sym (planul de simetrie)

Planul de simetrie reprezintă practic o secțiune longitudinală prin domeniul de calcul, rezultatele calculate în această zonă fiind foarte importante. Presiunea exercitată de domeniul fazei lichide este asemănătoare ca distribuție cu cea aferentă peretelui mișcător, cu același maxim de 5,88e4 Pa la fundul tancului de testare.

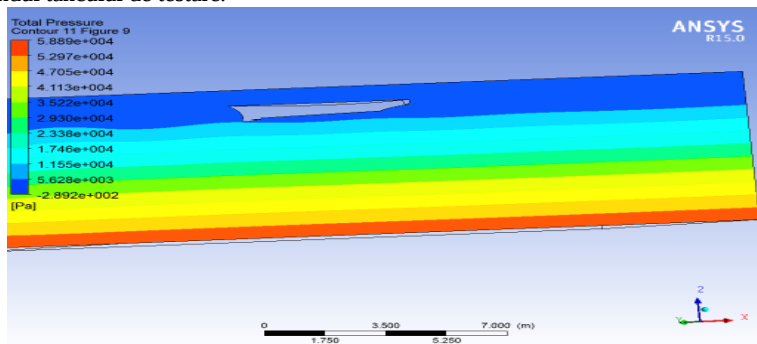


Figura 3.20 Presiune

Peretele mișcător impune și aerului o anumită viteză care are un maxim de 11,4 m/s într-o zonă apropiată de Flapper, iar deasupra navei tip vrachier o valoare medie de 3,4 m/s.

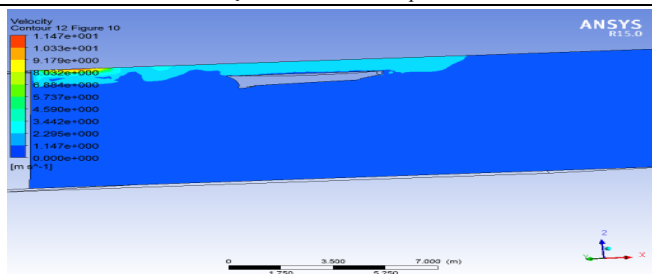


Figura 3.21 Viteză

Zona de fază lichidă este zona în care fracția volumică a apei este egală cu unitatea, cu roșu în figura de mai sus. Este vizibilă astfel forma valului generat de peretele mișcător.

3.4.5 Parametri de curgere calculați pentru zona de interfață

Se definește zona de interfață dintre faza gazoasă și cea lichidă ca fiind acea suprafață la care fracția volumică a apei este egală cu 0,5. Pe această suprafață se pot studia câteva dintre proprietățile valului.

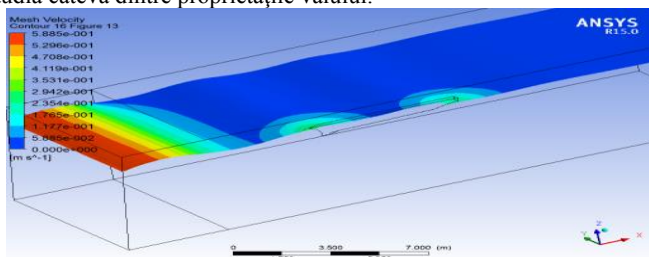


Figura 3.23 Viteză rețea EF

Valul așa cum a fost generat în această simulare este în fapt o rețea de volume finite mobile. Se poate calcula viteza acestei rețele la zona de interfață ca în figura de mai sus, rezultând că valul are o viteză mai mare aproape de peretele mișcător cu o maximă de 58,8 m/s prezentând și o accelerare în zona de impact cu chila navei tip vrachier care face ca aceasta să fie divergente circular la prova și pupa.

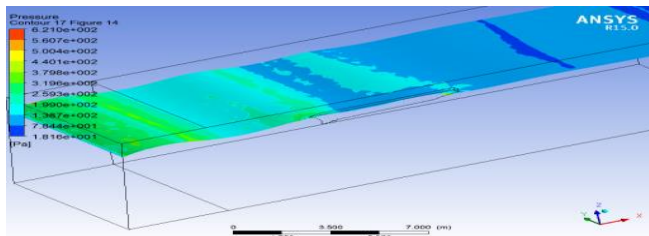


Figura 3.24 Presiune valuri

Valul ipso facto duce la o variație a presiunii locale astfel încât în zonele de creastă presiunea este mai mare cu maxime de 319 Pa, iar în zonele de prova și pupa vrachierului unde valul lovește chila lui, presiunile locale pot ajunge și la 621 Pa datorită interacțiunii cu structura vrachierului.

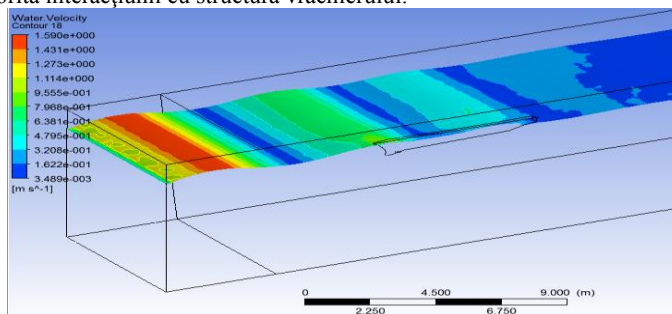


Figura 3.25 Viteză apă

Valul va avea o viteză a fazei lichide de 1,59 m/s aproape de peretele mișcător așa cum se vede mai sus.

3.5 Concluzii Capitolul 3

Scopul acestui capitol este de a familiariza cititorul cu terminologia de specialitate din simularea numerică a Efectului suprafețelor libere lichide de la bord asupra stabilității structurii navei tip vrachier, cu modul de generare a modelului geometric CAD al navei tip vrachier folosind SolidWorks 2014, metodele teoretice de determinare a caracteristicilor dinamice ale sistemelor reale, instrumentul numeric folosit a fost Interacțiunea dintre fluid și structură, iar apa mării a acționat prin intermediul valurilor asupra structurii navei vrachier care la rândul ei a acționat asupra încărcăturii care poate fi un fluid (sau asimilat unui fluid) și care fluid a reacționat asupra pereților magaziiilor de marfă generând fenomenul de sloshing. Așadar acest tip de interacțiune va guverna toate fenomenele legate de subiectul cercetării noastre. O importanță deosebită se acordă metodelor actuale în domeniul analizei modale și metodei cu element finit, iar pe baza acestor metode vor fi realizate analizele teoretice și experimentale din capitolul următor.

4. SIMULAREA NUMERICĂ A EFECTULUI SUPRAFEȚELOR LIBERE LICHIDE LA BORD- ETAPA 2

4.1 Introducere

Atunci când un fluid interacționează cu pereții unui container (tanc) care se mișcă, presiunea dinamică dezvoltată de valurile inerțiale ale fluidului pot cauza deformări importante ale pereților și structurii tancului. Mișcarea fluidului ia naștere datorită mișcării tancului. Acest fenomen atât în limba engleză cât și în limba română se numește „sloshing” și poate fi descris ca o mișcare a unui fluid care tinde spre o stare de echilibru în urma dezechilibrelor induse în masa sa, de către structura tancului în mișcare.

Efectele fenomenului de sloshing asupra structurii navelor a fost investigat de mulți cercetători. De pildă Mikelis and Journee (1984) [104] au prezentat o abordare cu diferențe finite în spațiul bidimensional a formării și dezvoltării fenomenului pe navele cu tancuri parțial pline comparându-se rezultatele analitice cu presiunile și momentele de încovoiere măsurate, rezultând o corelare acceptabilă între acestea.

Lee and Choi (1999) [85] a prezentat un studiu numeric și experimental al fenomenului de sloshing în navele tip cargo folosind o formulare cu elemente de frontieră de grad înalt pentru domeniul fluid și structura tancului cu elemente derivate din teoria plăcilor subțiri. S-a dedus că în cazul tancurilor incomplet umplute, valurile interne se formează când frecvența excitației se situează în apropierea modurilor proprii (de rezonanță) ale structurii.

Problema cuplării complete dintre fenomenul de sloshing și mișcarea structurii s-a abordat relativ recent pentru prima oară dată fiind complexitatea inerentă a unor asemenea modele. De pildă Kim, 2002 [72]; Rognebakke and Faltinsen, 2003 [120]; Kim et al., 2006 [74]; Lee et al., 2007a & b [84][86], au demonstrat importanța interacțiunii dintre fenomenul de sloshing, structura navei și mișcarea navei mai cu seamă atunci când volumul magaziiilor de marfă al fluidului raportat la întregul volum al navei, depășește o anumită valoare critică.

Recent Lee et al., 2007a [84] a realizat un studiu de sensibilitate a parametrilor pentru un tanc LNG folosind CFD (Dinamica Fluidelor asistată de Calculator) cu concluzia că vâscizitatea și densitatea fluidelor simulate nu au un efect sensibil asupra fenomenelor de sloshing.

4.2 Modelul matematic

Un model matematic este o interpretare matematică folosind instrumente abstracte ale aspectelor esențiale ale unui fenomen sau sistem. Pe aceste modele se bazează formularea cu volume finite CFD cu care se va lucra în continuare în modelarea fenomenului de sloshing. Ecuația de continuitate descrie transportul conservativ al unei cantități finite de fluid. Legea conservării masei arată că în mecanică, materia nu se crează și nu se distruge. Pentru un fluid tridimensional, incompresibil și în mișcare ecuația de continuitate este:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \phi} (u_\phi) + \frac{\partial}{\partial \phi} (u_z) = 0 \quad (4.1)$$

Unde u_r , u_ϕ and u_z sunt componentele vitezei fluidului într-un volum de referință finit, iar r , ϕ și z sunt coordonatele unui sistem de referință cilindric.

Ecuațiile Navier-Stokes sunt acele ecuații care pot descrie în termeni newtonieni mișcarea unui element de fluid vâscos, de volum finit.

Aceste ecuații se mai cunosc și drept ecuațiile de conservare a momentului în mecanica fluidelor.

Pentru coordonata „ r ” avem:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial}{\partial t} (u_r) + u_r \frac{\partial}{\partial r} (u_r) + \frac{u_\phi}{r} \frac{\partial}{\partial \phi} (u_r) + u_z \frac{\partial}{\partial z} (u_r) - \frac{(u_\phi)^2}{r} \right) = \\ = - \frac{\partial}{\partial r} (p) + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} - \frac{u_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\phi}{\partial \phi} \right] + \rho g_r \end{aligned} \quad (4.2)$$

Pentru coordonata „ ϕ ” avem:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial}{\partial t} (u_\phi) + u_r \frac{\partial}{\partial r} (u_\phi) + \frac{u_\phi}{r} \frac{\partial}{\partial \phi} (u_\phi) + u_z \frac{\partial}{\partial z} (u_\phi) + \frac{(u_\phi u_r)}{r} \right) = \\ = - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \phi} (p) + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_\phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\phi}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 u_\phi}{\partial z^2} - \frac{u_\phi}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \phi} \right] + \rho g_\phi \end{aligned} \quad (4.3)$$

Pentru coordonata „ z ” avem:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial}{\partial t} (u_z) + u_r \frac{\partial}{\partial r} (u_z) + \frac{u_\phi}{r} \frac{\partial}{\partial \phi} (u_z) + u_z \frac{\partial}{\partial z} (u_z) \right) = \\ = - \frac{\partial}{\partial z} (p) + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_z}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right] + \rho g_z \end{aligned} \quad (4.4)$$

Unde p este presiunea statică, $u_{r,\phi,z}$ sunt componentele vectorului vitează pe coordonatele sistemului de referință, μ este vâscozitatea dinamică, iar $\rho g_{r,\phi,z}$ sunt componentele forței gravitaționale pe axele de coordonate.

În fenomenul de sloshing tancul este împărțit între domeniul fluidului-marfă la care deasupra există un alt fluid: aerul atmosferic. Ca atare orice modelare trebuie să fie în principiu multifazică dat fiind că pe volumul tancului câmpul de viteze va fi împărțit între cele două faze, lichidă și gazoasă.

Ecuția de moment pentru un asemenea sistem multifazic este:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V}) + \nabla (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (4.5)$$

Unde p este presiunea statică, τ este tensorul tensiunilor din volumul finit, $\rho \vec{g}$ și $\vec{F}$ sunt vectorii forței gravitaționale și de forțe externe (de exemplu forța care se naște prin dispersia fazelor).

4.4 Simularea cu elemente și volume finite a efectului de sloshing la nava tip vrachier considerată

4.4.1 Strategia simulării numerice

Dat fiind că, încă de la început, este evident că simularea unui fenomen complex precum fenomenul de sloshing este suspect să implice masive resurse de calcul, s-a stabilit o strategie de simulare numerică. Mai întâi fiind vorba de prezența a două fluide este limpede că ANSYS CFX folosit la simularea comportamentului celor două fluide și anume apă de mare și aer în cazul simulării navei vrachier balastate pentru traversadă sau respectiv bauxită și aer în cazul simulării navei vrachier încărcate cu marfă, modelul curgerii multifazice se impune de la sine. Mai apoi, dat fiind că mișcarea pereților magaziiilor/hambarelor de marfă este complexă implicând tangaj și ridicarea navei pe val, după curbele deduse din figura 4.8, este iarăși clar că simularea se face cu modulul tranzitoriu al ANSYS CFX care să

simuleze efectele punctelor de încărcare (puncte discrete așezate pe aceste curbe de încărcare). În fine dat fiind că se pune problema analizei efectelor sloshingului asupra structurii navei tip vrachier, atunci interacțiunea dintre fluid și structură va fi modelată cu metoda „One Way Fluid-Structure Interaction”.

Aceasta implică simularea comportamentului fluidului prin CFX și apoi translatarea rezultatelor către modulul de calcul structural care pentru fiecare pas de calcul ia distribuțiile de presiuni de la CFX și efectuează calculul cu încărcarea respectivă, ca în figura 4.9.

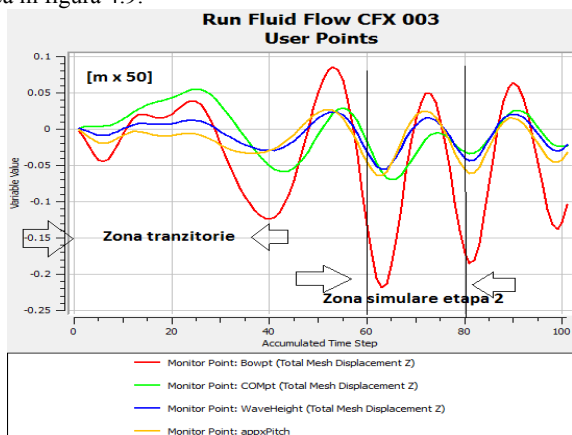


Figura 4.8 Curbele de încărcare (mișcarea centrului de greutate al navei tip vrachier) din etapa anterioară

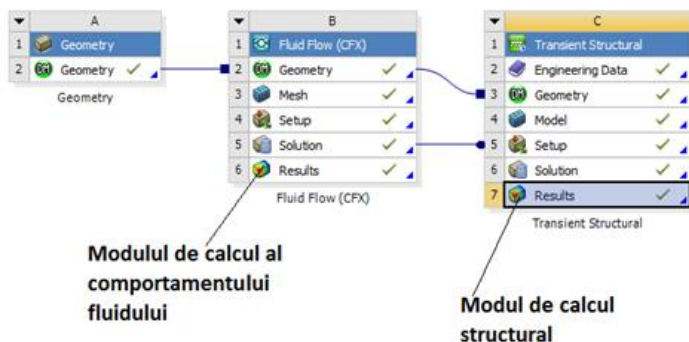


Figura 4.9 Organizarea simulării numerice

4.4.2 Modelul Geometric (CAD)

Se intenționează analiza fenomenelor tranzitorii ale fenomenului de sloshing pe durata a 20 de secunde în care Centrul de greutate al navei vrachier efectuează un ciclu complet de ridicare-rotire-coborâre, iar pentru fiecare secundă se stabilesc 4 puncte de calcul. Astfel simularea tranzitorie va avea 80 de puncte de

calcul (din 0,25 în 0,25 secunde) astfel încât să se asigure stabilitatea soluțiilor. Dacă pașii de calcul ar fi prea mari, atunci soluțiile își pierd stabilitatea, iar calculul eșuează. Dacă pașii ar fi prea mici atunci efortul de calcul devine imens. Ca atare o altă decizie în strategia de simulare este modelarea doar a zonei magaziiilor sau hambarelor de marfă generate în SolidWorks, așa cum se vede mai jos:

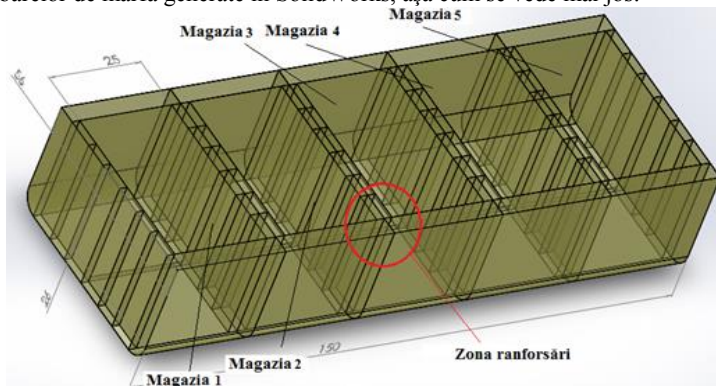


Figura 4.10 Modelul CAD

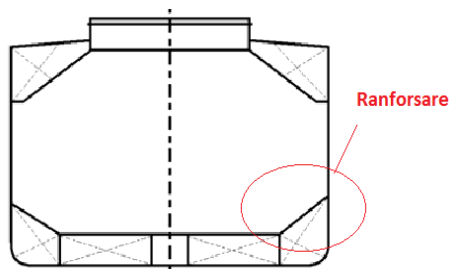


Figura 4.11 Soluția normală de ranforsare dintre peretele magaziei/hambarului de marfă și fundul acesteia

În această teză noțiunea de tanc sau de magazie (hambar) de marfă sunt echivalente. În mod deliberat, zona de ranforsare dintre peretele magaziei de marfă și fundul său a fost omisă, tocmai pentru a se studia efectele absenței unei asemenea ranforsări modelându-se astfel un concentrator de tensiuni. Sunt de asemenea (simplificat) prezente ranforsările pe linie longitudinală dar pe direcție transversală (coastele navei) ele sunt mult mai rare tocmai pentru a se studia efectul unui proiect slab.

Modelul CAD este evident simplificat lipsind modelarea exactă a coastelor sau tuturor guseelor dat fiind că un asemenea model ar necesita un efort de calcul masiv. Cu titlu de informare, cu 4 microprocesoare lucrând în paralel, timpul CPU pentru simularea magaziiilor/hambarelor de marfă balastate a fost de 1020 de minute (17 ore). Pentru o simulare a unei geometrii exacte apreciem că ar fi nevoie de 32 de microprocesoare.

4.4.3 Analiza numerică cu Ansys CFX

4.4.3.1 Datele de intrare ale modelului numeric CFD

La toate cele trei scenarii de simulare s-a analizat comportamentul fluidului (CFD) în toate cele cinci magazii/hambare de marfă. Pentru a se simula de exemplu existența fluidului doar în magazinele de marfă 1-3-5, la etapa de import a distribuției de presiuni dinspre CFX către modulul de calcul structural, pur și simplu presiunile pentru magazinele de marfă 2-4 nu au mai fost importate și ca atare modulul structural a făcut calculele în absența lor.

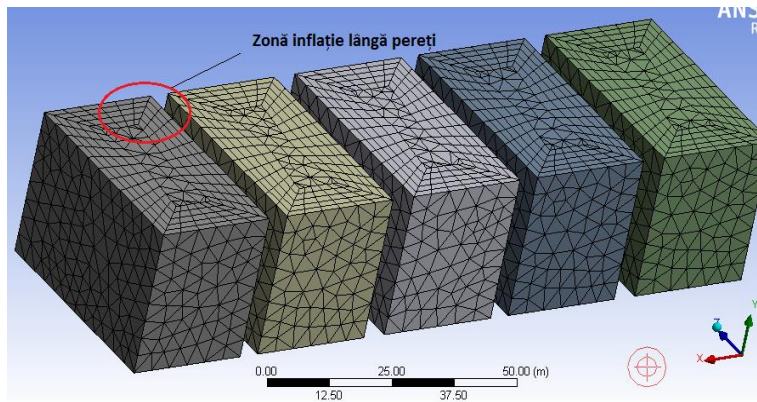


Figura 4.12 Rețeaua de volume finite la analiza CFD

Rețeaua de elemente finite pentru fiecare din domeniile magazinele de marfă este prezentată în figura de mai sus. Ca aspect specific dat fiind că de interes este comportamentul fluidului în imediata vecinătate a pereților magazinele de marfă, această zonă a fost discretizată prin inflație în 5 straturi astfel încât distribuția presiunilor în această zonă să fie cât mai acurat calculată.

Situația statistică a volumelor finite pe domenii este dată mai jos:

Domeniu	Noduri	Elemente
Magazia 1	2383	6148
Magazia 2	2372	6140
Magazia 3	2370	6142
Magazia 4	2340	5973
Magazia 5	2350	6026
Total	11815	30429

Tabel 4.1 Statistica volumelor finite

Condițiile la frontiere trebuie să asigure o frontieră tip Opening la partea superioară a magazinele/hambarele de marfă ca în figura de mai jos, pentru a se putea modela startul de aer de deasupra încărcăturii (sau apei de balast), iar pereții laterali

sunt definiția ca frontiere tip „Wall” care să funcționeze atât ca frontiere între faza fluidă și pereții solizi ai magaziiilor sau hambarelor de marfă, dar să poată primi mișcarea ce trebuie să simuleze mișcarea centrului de greutate a navei vrachier așa cum s-a definit mai sus.

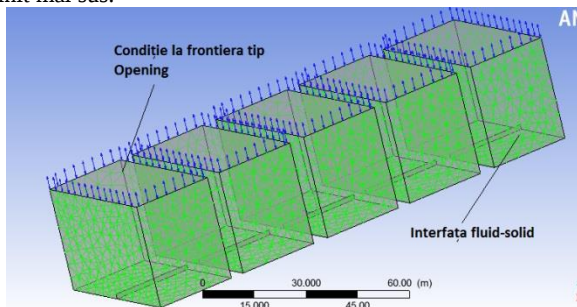


Figura 4.13 Condițiile la frontiere

Domeniu	Frontiere	
Magazia1	Boundary - Ambient1	
	Tip	OPENING
	Locație	top1
	Setări	
	Direcție curgere	Normal to Boundary Condition
	Regim curgere	Subsonic
	Masă și moment	Opening Pressure and Direction
	Presiune relativă	0.0000e+00 [Pa]
	Mișcare rețea EF	Unspecified
	Turbulență	Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
	Fluid	Air
	Fracție volumică	Value
	Fracție volumică	1.0000e+00
	Fluid	Water
	Fracție volumică	Value
	Fracție volumică	0.0000e+00
	Boundary - Interface1	

Tip	WALL
Locație	FS T1 Interface
Setări	
Masă și moment	No Slip Wall
Viteză perete relative la	Mesh Motion
Mișcare rețea EF	Specified Displacement
Componentă deplasare Rot Z	Rotz
Componentă deplasare Y	Dispy
Componentă deplasare Z	0.0000e+00 [m]
Deplasare	Cartesian Components
Rugozitate	Smooth Wall
Pereche fluide	Air Water

Tabel 4.2 Condițiile la frontiere CFX

Prin studierea graficului din figura 4.8 se poate conchide că deplasarea pe verticală a Centrului de greutate al navei vrachier (curba verde) și unghiul de tangaj (curba portocalie) pot fi simulate ca o mișcare de rotație după axa Z și de translație pe verticală după axa Y prin două funcții sinusoidale definite în funcție de timp (variabila time „t”) decalate între ele cu 20° astfel:

$$\text{Dispy} = 5[\text{m}] * \sin(0.32 * t / 1[\text{s}])$$

$$\text{Rotz} = 3[\text{rad}] * \sin(0.32 * t / 1[\text{s}] - 0.5)$$

Aceste variabile impuse mișcării pereților magaziilor/hambarelor vor simula cu o precizie acceptabilă mișcarea navei tip vrachier.

Materialele încărcăturii vor fi pentru Scenariul 1 apă de mare și aer, iar pentru Scenariile 2 și 3 Bauxită și aer. Bauxita este unul dintre cele mai importante minereuri de aluminiu și se compune în cea mai parte din mineralele ce conțin aluminiu ca:

- Gibbsit (Hydrargillit) $\text{Al}(\text{OH})_3$.
- Boehmit $\text{AlO}(\text{OH})$.
- Diaspor $\text{AlO}(\text{OH})$.

Bauxita mai poate conține minerale cu fier ca Hematit Fe_2O_3 și Goethit $\text{FeO}(\text{OH})$, ca și minerale argiloase Caolinit și minerale cu un conținut redus în oxizi de titan Anatas TiO_2 . În simulările de la Scenariul 2 și 3, proprietățile bauxitei sunt:

- Densitate = $3,2\text{e}3 \text{ kg/m}^3$;
- Vâscozitate cinematică = 11,70 cSt

Pentru apă și aer proprietățile sunt cele standard.

Opțiunea de definire a materialului este Multifazică, apă/bauxită și aer.

De remarcat că modelul de turbulență folosit este modelul k-omega în locul modelului k-epsilon care ar fi modelul standard, dat fiind că modelul k-omega

este mult mai eficace în tratarea comportamentului fluidului în apropierea pereților magazii de marfă, ceea ce este de interes pentru noi.

Scenariile de simulare sunt următoarele:

- Scenariul 1- Toate magazinele de marfă balastate 50%
- Scenariul 2- Magazinele 1-3-5 cu marfă 50%
- Scenariul 3- Magazinele 2-4 cu marfă 65%

Rezultatele obținute vor fi date pentru pașii de la secunde 5, 10, 15 și 20 dat fiind că prezentarea tuturor rezultatelor de la cele 80 de pași de simulare este nefezabilă. În schimb pentru cele mai importante rezultate sunt disponibile animații care vor fi prezentate la susținere care arată evoluția parametrilor calculați pentru toți cei 80 de pași.

4.4.4 Scenariul 1- Toate magazinele de marfă balastate 50%

• Evoluția suprafeței libere apă-aer

Evoluția în timp a acestei suprafețe este dată de stabilirea la CFX-Post a redării variabilei apă. Frația volumică a apei = 0,5 care prin definiție delimitează domeniul ocupat de aer de cel ocupat de apă.

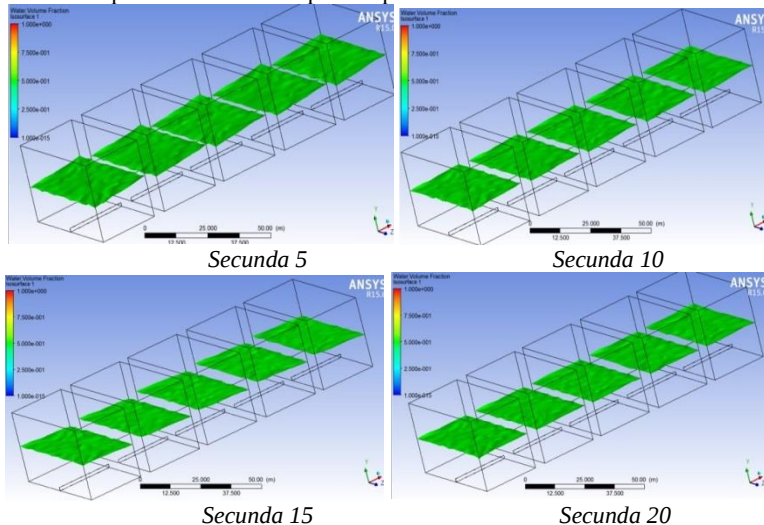


Figura 4.14 Evoluția suprafeței libere în timp (animație disponibilă)

Mai explicit din animație se va vedea că mișcarea pereților magazii/hambarelor de marfă după legea impusă va face ca fluidul conținut să rămână inerțial în urmă, ceea ce va genera un dezechilibru în masa fluidului ce va genera un val intern care în sine este efectul de sloshing.

• Evoluția densității în timp

Densitatea în interiorul magazii/hambarelor de marfă este dată de densitatea diferită a aerului și apei de mare, astfel încât aceasta va urmări evoluția valului intern. Cu albastru este spațiul ocupat de către aer cu o densitate de $1,185 \text{ kg/m}^3$, iar cu roșu apa cu densitatea de 997 kg/m^3 ca în figura 4.17.

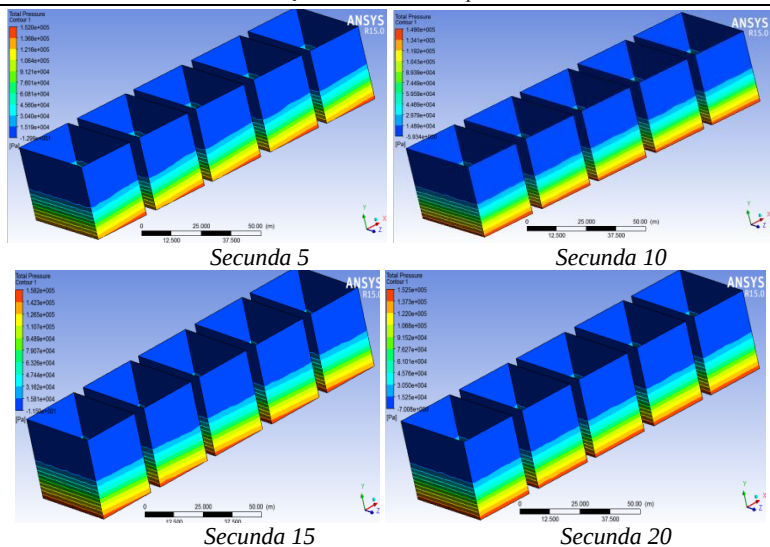


Figura 4.16 Evoluția presiunii pe pereți în timp –secțiune (animație disponibilă)

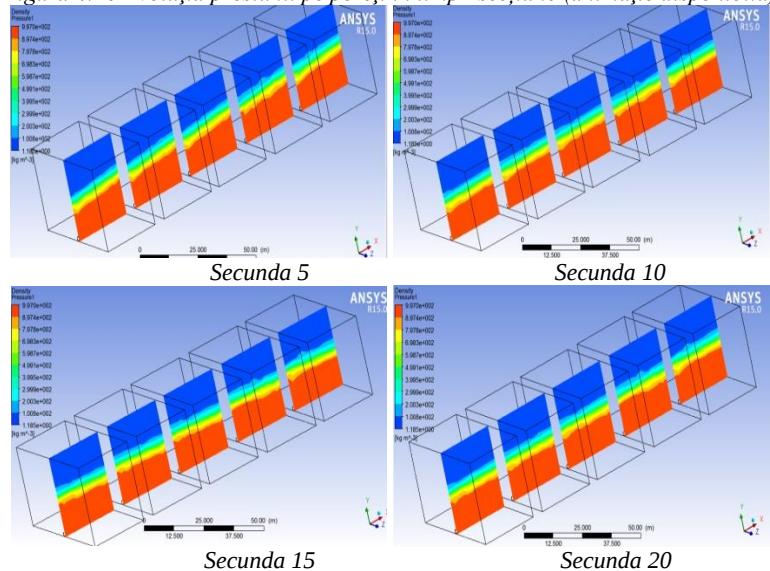


Figura 4.17 Evoluția densității în timp –secțiune (animație disponibilă)

- **Tensiunea de forfecare indusă de lichid asupra peretelui magaziei de marfă**

Datorită frecării dintre lichid și peretele magaziei/hambarului de marfă va apărea și o tensiune de forfecare așa cum se vede mai jos:

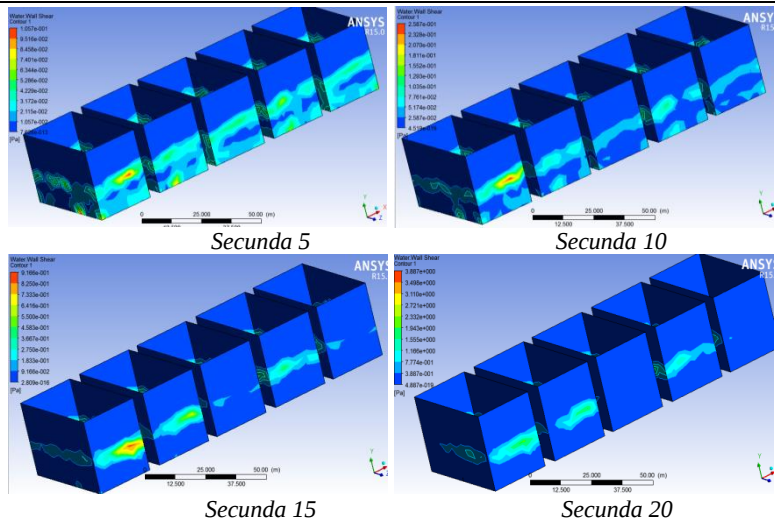


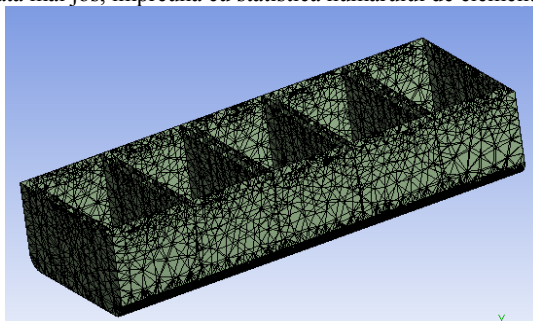
Figura 4.20 Evoluția tensiunii de forfecare în timp –secțiune (animație disponibilă)

Fiind dependentă de frecarea dintre fluid și peretele magaziei/hambarului de marfă, cu cât presiunea și deplasarea locală sunt mai mari, cu atât apar tensiuni de forfecare relativ mici cu valori între 1,2-8 Pa.

4.4.5 Analiza numerică cu Ansys Modulul structural Scenariul 1

4.4.5.1 Datele de intrare în simulare

Geometria CAD de intrare în simularea structurală, evident, este aceeași cu cea folosită în simularea CFD. În ceea ce privește rețeaua de elemente finite, aceasta este dată mai jos, împreună cu statistica numărului de elemente și de noduri:



Statistică rețea EF	
Noduri	230359
Elemente Finite	129192

Figura 4.23 Rețeaua de elemente finite

În ceea ce privește condițiile la frontiere, acestea sunt de tip Presiune importate de la modulul CFD, de tip Fixed Displacement ce sunt aplicate la fundul magaziei și de tip Variable pressure aplicată pe bordurile navei tip vrachier ce simulează presiunea apei mării asupra structurii navei vrachier, mai mare la adâncime mai mare și mică spre suprafața mării, ca în figura de mai jos.

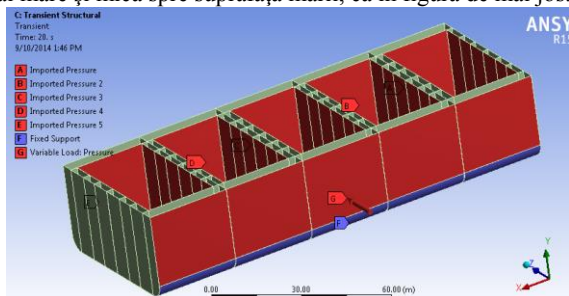


Figura 4.24 Condițiile la frontiere aplicate

Date tabelar condițiile la frontieră sunt:

Date tabelar conținând informații tehnice:

Nume obiect	Fixed Support	Pressure			
Status	Fully Defined				
Scop					
Metodă	Geometry Selection				
Geometrie	3 Faces	2 Faces			
Definiții					
Tip	Fixed Support	Pressure			
Suprimat	No				
Definit de		Normal To			
Mărime		= 0.15e5*(20-y/2)			
Nume obiect	Imported Pressure	Imported Pressure 2	Imported Pressure 3	Imported Pressure 4	Imported Pressure 5
Stats	Solved				
Scop					
Metodă	Named Selection				
Named Selection	SF-T1-Interface	SF-T2-Interface	SF-T3-Interface	SF-T4-Interface	SF-T5-Interface
Definiții					
Tip	Imported Pressure				
Tabular Loading	Program Controlled				
Suprimat	No				
Graphics Controls					

Contribuții la studiul interacțiunii dintre mișcarea suprafețelor libere lichide și mișcările navei în condiții de val la navele tip vrachier

Component	All				
Transfer Definition					
CFD Surface	Interface1	Interface2	Interface3	Interface4	Interface5
CFD Data					
CFD Results File	C:\Teză_Doctorat\Marinel-Dănuț Lambă\Simulare\FSI\FSI Full Ballast\Full Ballast_files\dp0\SYS\MECH\Solution\Fluid Flow CFX_001.res				

Tabel 4.4 Condiții la frontieră CFX

Materialul structurii este oțel de nave cu caracteristicile mecanice date jos:

Densitate	7850 kg m ⁻³				
Coeficient expansiune termică	1.2e-005 C ⁻¹				
Căldură specifică	434 J kg ⁻¹ C ⁻¹				
Conductivitate termică	60.5 W m ⁻¹ C ⁻¹				
Rezistivitatea	1.7e-007				
Rezistență la curgere					
2.5e+008					
Rezistență la rupere					
4.6e+008					
Tensiune alternativă Pa	Cicluri	Tensiune medie Pa			
3.999e+009	10	0			
2.827e+009	20	0			
1.896e+009	50	0			
1.413e+009	100	0			
1.069e+009	200	0			
4.41e+008	2000	0			
2.62e+008	10000	0			
2.14e+008	20000	0			
1.38e+008	1.e+005	0			
1.14e+008	2.e+005	0			
8.62e+007	1.e+006	0			
Coeficient de rezistență Pa	Exponent rezistență	Coeficient ductilitate	Exponent ductilitate	Coeficient rezistență ciclică Pa	Durificare ciclică
9.2e+008	-0.106	0.213	-0.47	1.e+009	0.2
Modul Young Pa	Coeficient Poisson	Modul volumic Pa	Modul forță tăietoare Pa		
2.e+011	0.3	1.6667e+011	7.6923e+010		

Tabel 4.5 Caracteristici mecanice oțel

4.4.5.2 Rezultate simulare structurală

Pentru o citire concentrată rezultatele simulării (Secunda 20) sunt date tabelar mai jos:

Nume obiect	Deformație totală	Deformație echivalentă totală	Tensiune echivalentă	Deplasare direcțională	Deformație elastică de forfecare	Tensiune forfecare	Energie deformare
Minim	0. m	2.5436e-015 m/m	1.1064 e-004 Pa	-5.8683 e-002 m	-2.5785 e-03m/m	-1.9835 e+008 Pa	1.5082 e-023 J
Maxim	5.8694e-002 m	4.8634e-003 m/m	8.962e+008 Pa	5.5952e-002 m	2.4852e-003 m/m	1.9117e+008 Pa	38179 J

Tabel 4.6 Rezultate maxime și minime

• Deplasarea totală

Deplasarea totală contorizează rezultantele tuturor deplasărilor pe toate direcțiile axelor de coordonate. Dată fiind dimensiunea mare a domeniului modelat, deplasarea maximă este de 0,058 m la peretele mărginaș al magaziei/hambarului de marfă 5 (cu eticheta MAX) ceea ce la lungimea totală a domeniului de 150 m, este rezonabil. Se mai poate remarca un fenomen de „înfundare” la nivelul magaziiilor/hambarelor de marfă 1 și 5 pe partea de bord, ca efect al lipsei unei structuri de coaste bine proiectate. O primă recomandare ar fi (așa cum încă de la început am stabilit) întărirea bordurilor navei tip vrachier cu coaste suplimentare.

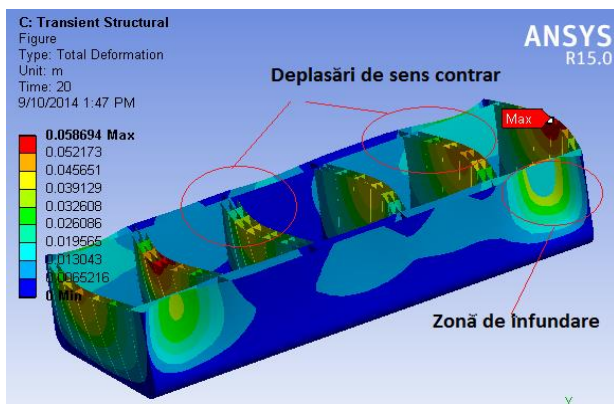


Figura 4.25 Deplasarea totală

• Deformația elastică echivalentă

Un alt semnal de alarmă este prezența unei deformații echivalente von Mises maxime de 0,00486 la baza peretelui dinspre pupa a magaziei/hambarului de marfă 4. Cum deformația maximă care delimitează pentru oțeluri domeniul elastic de cel plastic este de 0,002 înseamnă că această regiune este puternic deformată.

Ca atare, așa cum s-a precizat încă, de la început, zona (zonele) de trecere de la pereții magaziiilor/hambarelor de marfă la fundul navei tip vrachier, trebuie ranforsată și reproiectată pentru eliminarea acestor puternici concentratori de tensiuni.

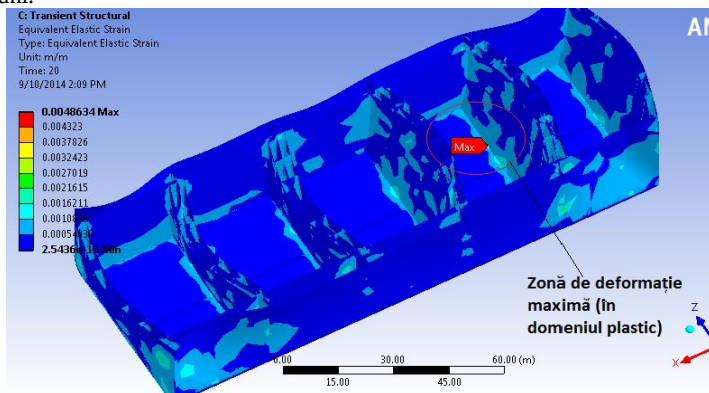


Figura 4.26 Deformația elastică echivalentă

- **Tensiunile echivalente von Mises**

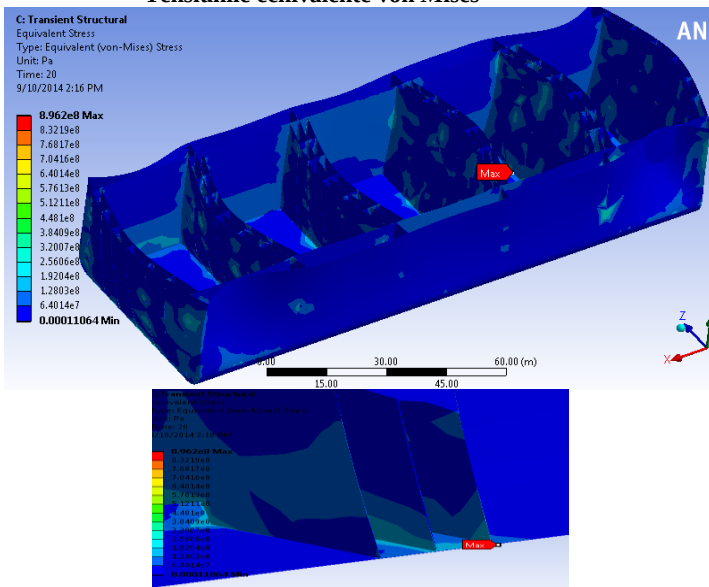


Figura 4.27 Tensiunea echivalentă

Se poate observa că în exact aceeași zonă de deformare maximă se atinge tensiunea echivalentă maximă de $896e6$ Pa. Dat fiind că rezistența la rupere a materialului este de $460e6$ Pa, rezultă că în zona respectivă materialul va ceda.

- **Rezistența la oboseală**

Se poate calcula și rezistența la oboseală:

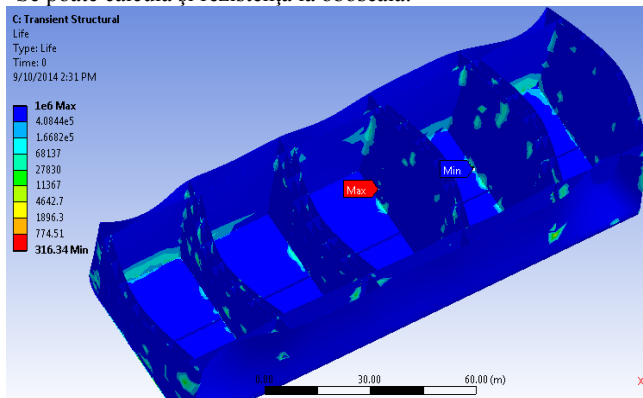


Figura 4.28 Rezistența la oboseală

Supusă unui ciclu alternant simetric, structura navei tip vrachier va ceda în zona concentratorului de tensiuni doar după 316 cicluri sau mai bine spus 6320 secunde, după care fisura care apare se va propaga inexorabil.

4.4.6 Scenariul 2- Magaziile 1-3-5 încărcate cu 50% bauxită

- **Evoluția suprafeței libere bauxită-aer**

Evoluția în timp a acestei suprafețe este dată de stabilirea la CFX-Post a redării variabilei apă. Frația volumului de apă este egală cu 0.5 și care prin definiție delimitează domeniul ocupat de aer de cel ocupat de bauxită.

Mai explicit din animație se va vedea că mișcarea pereților magaziiilor sau hambarelor de marfă după legea impusă va face ca fluidul (bauxită) conținut să rămână inerțial în urmă, ceea ce va genera un dezechilibru în masa fluidului ce va genera un val intern care în sine este efectul de sloshing, la fel ca și la situația cu magazinele/hambarele de marfă balastate 50%.

- **Evoluția câmpurilor de presiuni totale**

Câmpurile de presiuni totale (care includ și presiunile dinamice) pot fi vizualizate atât în două secțiuni longitudinale și transversale prin domeniile magaziiilor/hambarelor de marfă, dar și la nivelul pereților magaziiilor/hambarelor de marfă, așa cum se vede în figura 4.30.

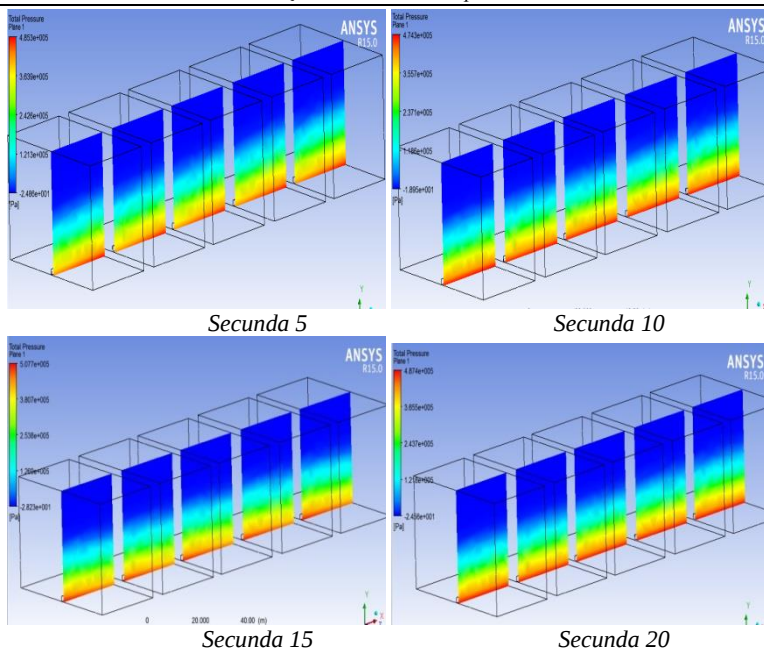


Figura 4.30 Evoluția presiunii în timp –secțiune (animație disponibilă)

De această dată bauxita având o densitate mai mare, presiunea exercitată la același grad de umplere al magaziiilor/hambarelor de marfă (50%), va varia între 4,7 și 5,1e5 Pa spre deosebire de apă care dezvoltă 1,4-1,53e5 Pa. Este de așteptat ca efectele asupra structurii navei tip vrachier să fie mai accentuate.

Pentru evoluția presiunii totale pe pereți se va vedea în figura 4.31.

• Evoluția densității în timp

Densitatea în interiorul magaziiilor/hambarelor de marfă este dată de densitatea diferită a aerului și apei de mare, astfel încât aceasta va urmări evoluția valului intern. Cu albastru este spațiul ocupat de către aer cu o densitate de $1,185 \text{ kg/m}^3$, iar cu roșu bauxita cu densitatea de 3200 kg/m^3 ca în figura 4.32. Se va vedea că spre deosebire de cazul în care aveam doar apă în magazinele/hambarele de marfă, zona de tranziție dintre aer și bauxită s-a îngustat, datorită diferenței de densitate mult mai marcate.

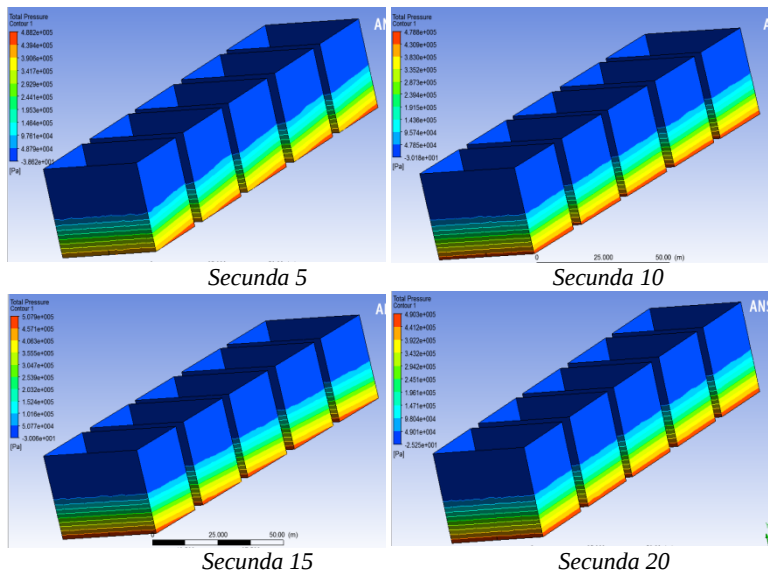


Figura 4.31 Evoluția presiunii pe pereți în timp –secțiune (animație disponibilă)

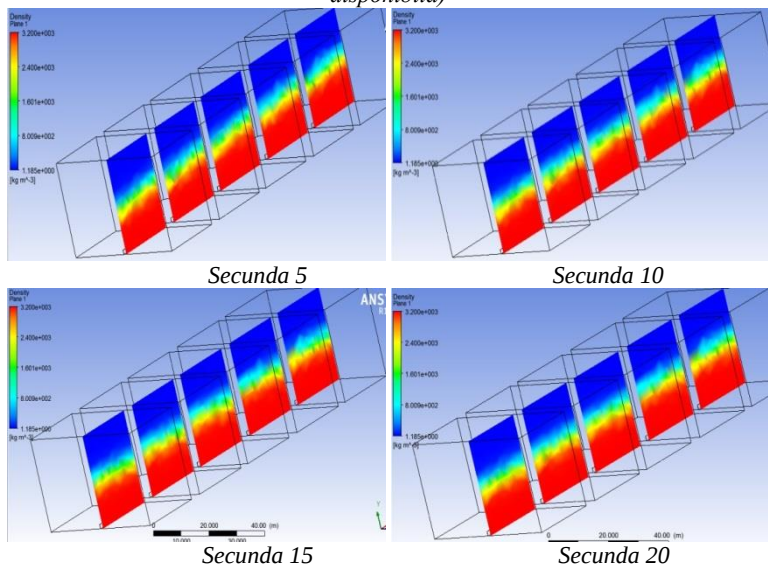


Figura 4.32 Evoluția densității în timp –secțiune (animație disponibilă)

- **Viteza valului intern**

Valul intern în cursul evoluției sale va avea o anumită viteză, iar ceea ce s-a văzut în cazul apei este valid și pentru bauxită. Vitezele maxime variază în același domeniu de 1,1 și 2,2 m/s ceea ce arată că viteza fluidului din magazii/hambare de marfă nu depinde de densitatea și vâscozitatea lui.

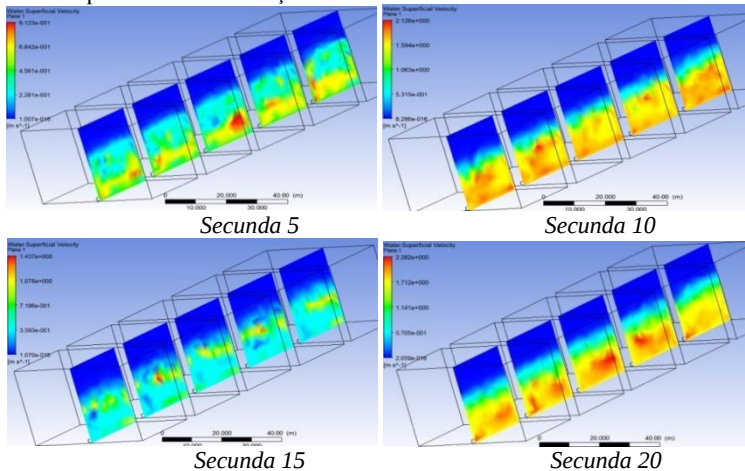


Figura 4.34 Evoluția vitezei apei de balast în timp –secțiune (animație disponibilă)

- **Tensiunea de forfecare indusă de lichid asupra peretelui**

Datorită frecării dintre lichid și pereții magaziiilor/hambarelor de marfă va apărea și o tensiune de forfecare așa cum se vede mai jos:

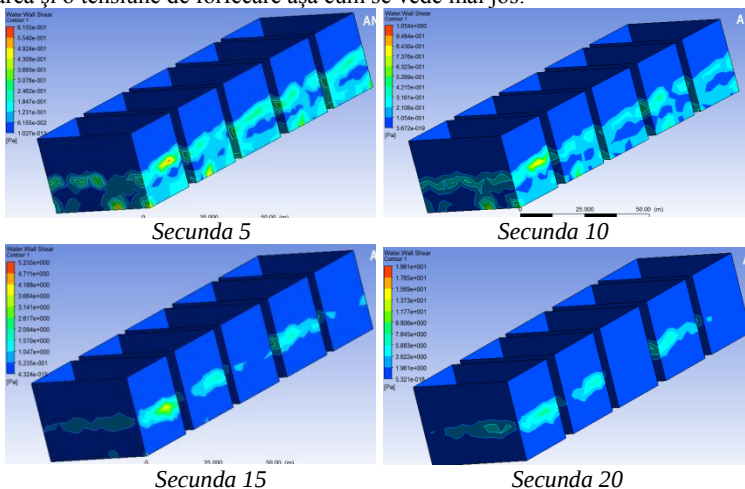


Figura 4.35 Evoluția tensiunii de forfecare în timp –secțiune (animație disponibilă)

Fiind dependentă de frecarea dintre bauxită și peretele magaziei de marfă, cu cât presiunea și deplasarea locală sunt mai mari, cu atât local apar tensiuni de forfecare relativ mici cu valori între 0,6-19 Pa, dar mult mai mari decât frecarea dintre apă și peretele magaziei de marfă.

4.4.7 Analiza numerică cu Ansys Modulul structural Scenariul 2

4.4.7.1 Datele de intrare în simulare

În ceea ce privește condițiile la frontiere, singura diferență față de Scenariul 1 este că presiunile calculate în CFX se vor importa doar pentru magazinele/hambarele de marfă 1-3-5, celelalte două fiind lăsate neîncărcate.

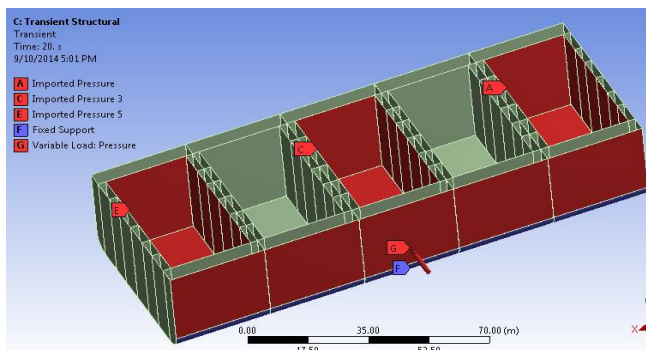


Figura 4.37 Condițiile la frontiere aplicate

4.4.7.2 Rezultate simulare structurală

Pentru o citire concentrată rezultatele simulării (Secunda 20) sunt date tabelar mai jos:

Nume obiect	Deformație totală	Deformație echivalentă totală	Tensiune echivalentă	Deplasare direcțională	Deformație elastică de forfecare	Deformație plastică	Tensiune forfecare
Minim	0. m	1.9262e-015 m/m	4.7555e-005 Pa	-2.7494e-002 m	-1.7738e-003 m/m	0. m/m	-1.3644e+008 Pa
Maxim	4.1214e-002 m	4.1965e-003 m/m	4.8284e+008 Pa	2.3524e-002 m	1.6501e-003 m/m	0. m/m	1.2693e+008 Pa

Tabel 4.7 Rezultate maxime și minime

• Deplasarea totală

Cele menționate la Scenariul 1 sunt egal valabile și acum, cu deosebirea că datorită încărcării doar a magaziiilor 1-3-5 și în condițiile existenței bauxitei, deplasarea totală rămâne foarte apropiată ca valoare maximă, la 0,041 m (față de

0,058 m), ceea ce arată că forțele de inerție mai mari deși, doar 3 magazii/hambare de marfă sunt încărcate cu 50% bauxită, generează deformări comparativ apropiate, de cazul navei balastate (50%). Așadar fenomenul de sloshing are un cuvânt de spus, în starea globală de solicitare a structurii navei tip vrachier.

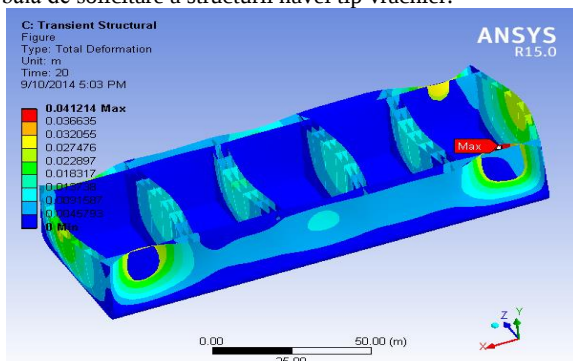


Figura 4.38 Deplasarea totală

- **Deformația elastică echivalentă**

Un alt semnal de alarmă este prezența unei deformații echivalente von Mises maxime de 0,00486 la baza peretelui dinspre pupa a magaziei/hambarului 5. Cum deformația maximă care delimitează pentru oțeluri domeniul elastic de cel plastic este de 0,002, înseamnă că această regiune este puternic deformată. Ca atare așa cum s-a precizat încă de la început, zona (zonele) de trecere de la pereții magaziiilor/hambarelor de marfă la fundul navei tip vrachier, trebuie ranforsată și reprojectată pentru eliminarea acestor puternici concentratori de tensiuni.

La fel, deformația echivalentă calculată este de 0,0041 față de 0,00486 la cazul magaziiilor/hambarelor de marfă balastate (50%) și deci asemănător, concluzia este că densitatea fluidului are impact asupra încărcării și stabilității structurale a navei tip vrachier.

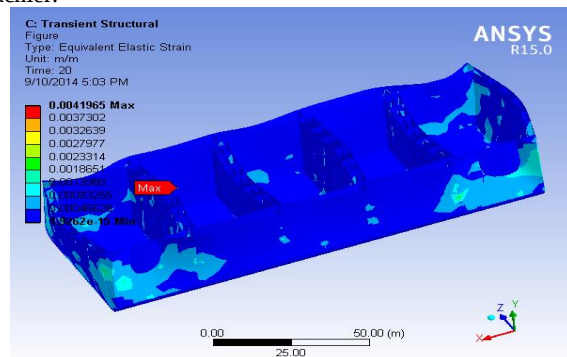


Figura 4.39 Deformația elastică echivalentă

- **Tensiunile echivalente von Mises**

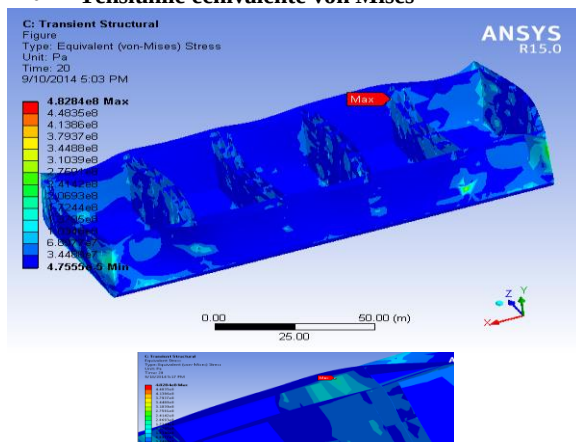


Figura 4.40 Tensiunea echivalentă

Acum, datorită încărcării inegale a magaziilor/hambarelor de marfă, starea de tensiune maximă s-a mutat de la magazia de marfă numărul 4 către magazia de marfă numărul 5, cu o valoare mult diminuată, la 482 MPa (de la 896 MPa). Fiind în continuare o tensiune mai mare decât cea de rupere (460e6 Pa), zona din figura de mai sus este suspectă la a ceda.

- **Rezistența la oboseală**

Se poate calcula și rezistența la oboseală:

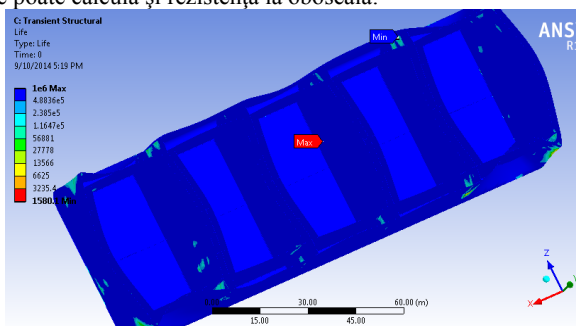


Figura 5.41 Rezistența la oboseală

Supusa unui ciclu alternant simetric, structura navei tip vrachier va ceda în zona concentratorului de tensiuni doar după 1580 cicluri.

4.4.8 Scenariul 3- Magaziile 2-4 încărcate cu 65% bauxită

- **Forța superficială de tensiune**

Așa cum se vede mai jos în fiecare magazie de marfă acolo unde suprafața liberă are curbura cea mai mică apar forțele superficiale cele mai puternice variind între 1,6 și 1,8e-4 identic cu cazul anterior.

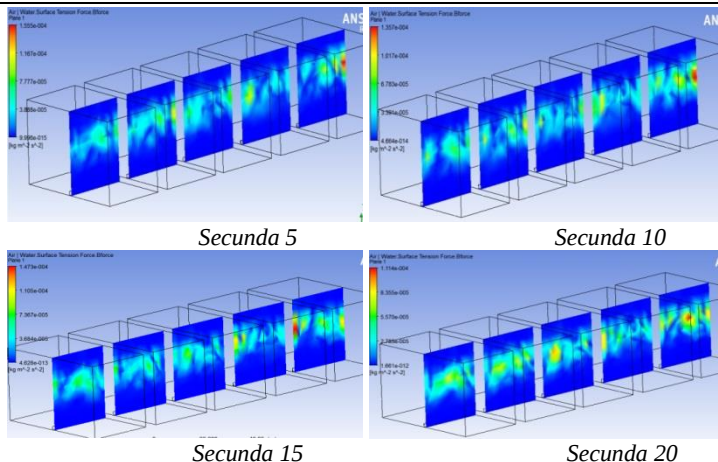


Figura 4.45 Evoluția forței de tensiune superficială în timp –secțiune (animație disponibilă)

• Viteza valului intern

Valul intern în cursul evoluției sale va avea o anumită viteză, iar ceea ce s-a văzut în cazul apei este valid și pentru bauxită. Vitezele maxime variază în același domeniu de 1,1-2,2 m/s ceea ce arată că viteza fluidului din magaziile/hambarele de marfă nu depinde de densitatea și vâscozitatea lui. Nici o deosebire față de cazul anterior.

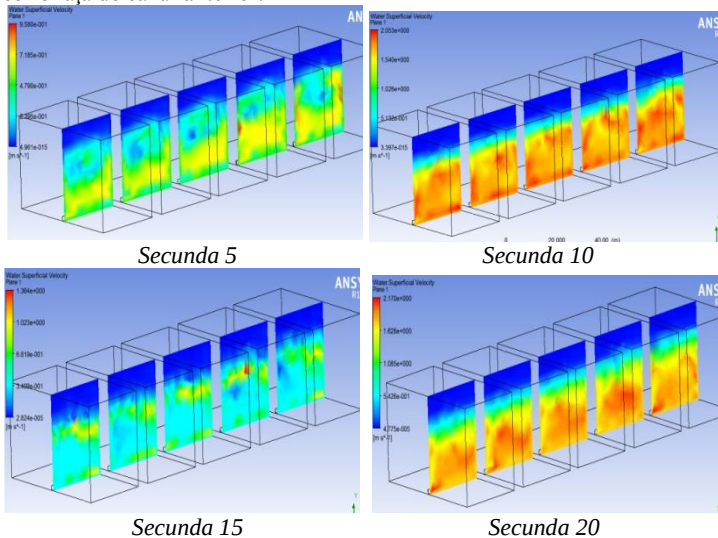


Figura 4.46 Evoluția vitezei apei de balast în timp –secțiune (animație disponibilă)

- **Tensiunea de forfecare indusă de lichid asupra peretelui**

Datorită frecării dintre lichid și pereții magaziiilor/hambarelor de marfă va apărea și o tensiune de forfecare așa cum se vede mai jos:

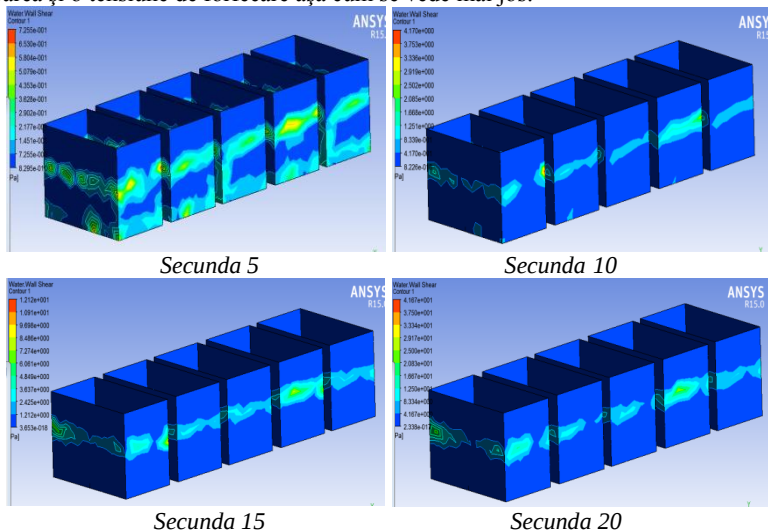


Figura 4.47 Evoluția tensiunii de forfecare în timp –secțiune (animație disponibilă)

Fiind dependentă de frecarea dintre bauxită și peretele magaziiilor/hambarelor de marfă, cu cât presiunea și deplasarea locală sunt mai mari, cu atât apar tensiuni de forfecare relativ mici cu valori între 0,6-41 Pa, mai mari decât frecarea din cazul anterior. Se confirmă că frecarea (dependentă de presiune) influențează tensiunea de forfecare dintre bauxită și pereții magaziiilor/hambarelor de marfă.

4.4.9 Analiza numerică cu Ansys Modulul structural Scenariului 3

4.4.9.1 Datele de intrare în simulare

În ceea ce privește condițiile la frontiere, singura diferență față de Scenariul 1 este că presiunile calculate în CFX se vor importa doar pentru magaziiile/hambarele de marfă 2-4, celelalte trei fiind lăsate neîncărcate.

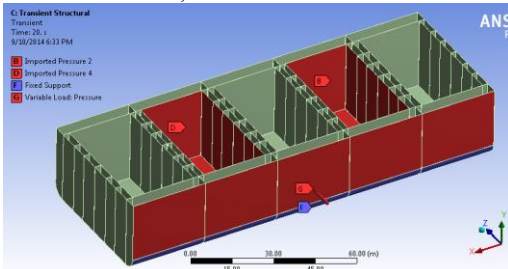


Figura 4.48 Condițiile la frontieră aplicate

4.4.9.2 Rezultate simulare structurală

Pentru o citire concentrată rezultatele simulării (Secunda 20) sunt date tabelar mai jos:

Nume obiect	Deformație totală	Deformație echivalentă totală	Tensiune echivalentă	Deplasare direcțională	Deformație elastică de forfecare	Tensiune forfecare
Minim	0. m	2.2205e-015 m/m	1.0253e-004 Pa	-3.2794e-002 m	-1.7883e-003 m/m	-1.3756e+008 Pa
Maxim	3.9555e-002 m	3.8936e-003 m/m	7.1346e+008 Pa	3.6499e-002 m	2.0794e-003 m/m	1.5996e+008 Pa

Tabel 4.8 Rezultate maxime și minime

• Deplasarea totală

Cele menționate la Scenariul 1 și 2 sunt egal valabile și acum, dar situația se agravează. Datorită înălțimii coloanei de marfă, impactul asupra deformațiilor pe bordurile navei tip vrachier devin critice, ajungând la 39 mm. Este clar că numărul și dispunerea coastelor și ranforsărilor sunt critice în stabilitatea structurii navei vrachier.

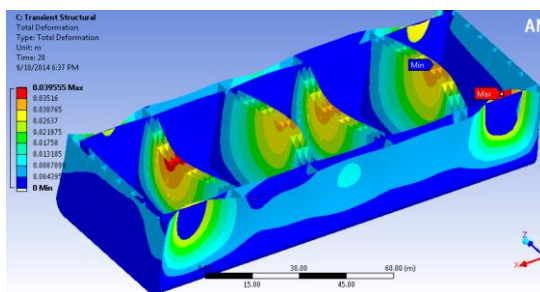


Figura 4.49 Deplasarea totală

• Deformația elastică echivalentă

Cum magazia/hambarul de marfă 2 cu probleme în Scenariul 1 este din nou plină, punctul critic cu deformații echivalente mari de la zona de îmbinare perete transversal și fundul magaziei de marfă, se reactivează, ajungând la 0,0038.

Ca atare așa cum s-a precizat încă de la început, zona (zonele) de trecere de la pereții magaziiilor de marfă la fundul navei, trebuie ranforsată și reproiectată pentru eliminarea acestor puternici concentratori de tensiuni.

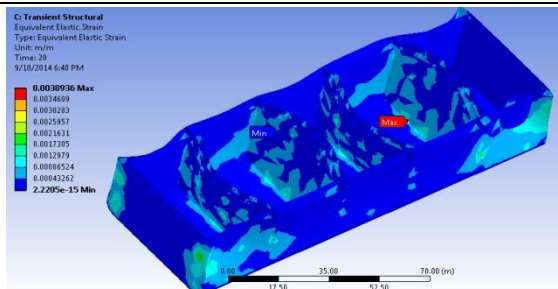


Figura 4.50 Deformația elastică echivalentă

- **Tensiunile echivalente von Mises**

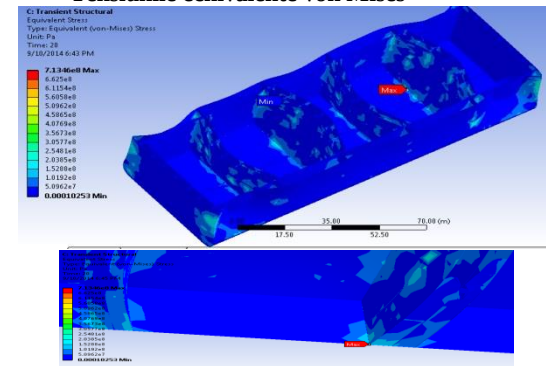


Figura 4.51 Tensiunea echivalentă

Tensiunea maximă echivalentă din punctul critic crește de la 482 MPa la 713 MPa, mult mai mare decât tensiunea decât de rupere (460e6 Pa), zona din figura de mai sus este suspectă la a ceda.

- **Rezistența la oboseală**

Se poate calcula și rezistența la oboseală, așa cum vede în figura 4.52.

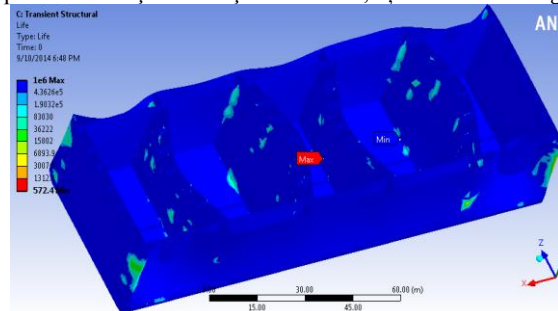


Figura 4.52 Rezistența la oboseală

Supusă unui ciclu alternant simetric, structura navei tip vrachier va ceda în zona concentratorului de tensiuni doar după 572 cicluri.

4.5 Concluzii Capitolul 4

Contribuțiile semnificative pe care le aduce această lucrare și câteva dintre concluziile cele mai importante sunt după cum urmează:

- Sistemul modelat prin analiză numerică este fără îndoială un fenomen complex. În cuvinte simple valurile mării mișcă nava tip vrachier într-un anumit fel apoi pereții magaziiilor/hambarelor de marfă mișcă apa sau marfa fluidă (sau pulverulentă precum bauxita) și în fine fenomenul de sloshing solicită structura navei vrachier deseori peste capacitatea ei. Toate aceste etape au fost parcurse în capitolele prezentate.

- În schimb densitatea și forțele de presiune dezvoltate în cursul evoluției fluidului în magazie/hambar de marfă, au un efect important asupra frecărilor cu pereții magaziiilor de marfă și implicit asupra tensiunilor de forfecare care se dezvoltă la nivelul interfețelor dintre fluid și pereții magaziiilor de marfă.

- Mai mult, s-a arătat că în procesul de proiectare al corpului navei tip vrachier, este esențială considerarea fenomenului de sloshing, buna proiectare având un impact serios asupra dezvoltării fisurilor și propagării acestora în structură, cu consecințe asupra duratei de viață a navei tip vrachier.

5. VALIDARE CALITATIVĂ A MODELELOR

5.1 CFD versus Testele pe modele la scară redusă

Validarea rezultatelor deduse în această lucrare poate fi făcută pe cale experimentală pe modele la scară redusă și extrapolând la scară reală conform teoriilor de echivalență ale lui Froude sau validarea calitativă, prin comparație cu alte lucrări.

5.2 Validare calitativă

Validarea calitativă înseamnă compararea lucrării de față cu articole publicate. Rezultatele nu pot fi aceleași dat fiind că geometriile și ipotezele de lucru nu sunt aceleași, dar până la un anumit punct se va vedea că abordarea este simetrică, iar din punct de vedere calitativ lucrarea noastră a generat rezultate credibile.

- *Interaction of liquid motion on mobile tank structure* - Mariusz Domaga, Edward Lisowski, Cracow University of Technology, Department of Mechanical Engineering Jana Pawła II Street 37, 31-864 Kraków, Poland, Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 18, No. 3, 2011[99]

În această lucrare „Interacțiunea dintre mișcarea lichidului și structura unui rezervor mobil” se studiază interacțiunea dintre fluid-structură a unui fluid cuprins într-un tanc de depozitare și transport cu lungimea de 8 m și diametru de 1,2 m ca mai jos:

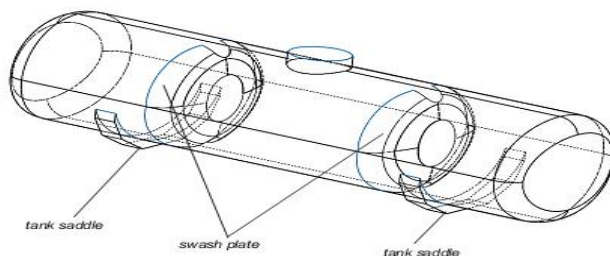
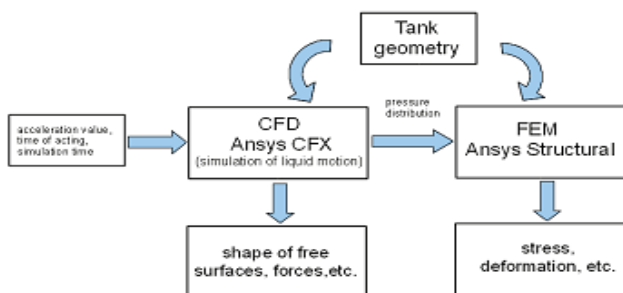


Figura 5.8 Tanc de depozitare-transport studiat[99]

Ceea ce face acest articol interesant pentru noi este că sunt implicate aceleași softuri ca și noi și anume Ansys, în aceeași ipoteza a „One way fluid structure interaction” sau interacțiunea dintre fluidul în mișcare și structură:

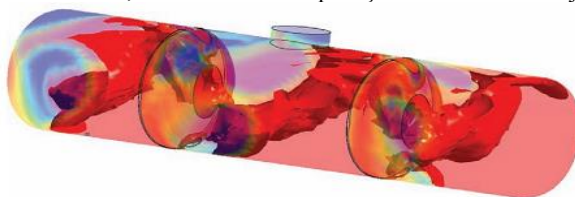
One way FSI simulation



One way FSI simulation of the tank

Figura 5.9 Modul FSI-1-Way de abordare identic cu al nostru[99]

Fluidul considerat este apă în condiții atmosferice normale, tancul este pe jumătate plin, modelul interfazic apă-aer este cel standard, accelerația (de frânare) a tancului este 2xg aplicată axial și 1xg lateral, modelul este k-epsilon standard de modelare a turbulenței iar simularea se face tranzitoriu pe durata a 5 secunde. După efectuarea calculului la 0,3 secunde forma suprafeței libere este ca mai jos:



Shape of water surface at time 0.3 [s]

Figura 5.10 Forma suprafeței libere la 0,3 s[99]

În mod identic cu procedura noastră, presiunile calculate sunt importate în modul de calcul structural.

Astfel importate în modulul de calcul structural, efectele presiunii sunt contorizate ca efecte asupra structurii, vezi în figura 5.12 pentru tensiunile echivalente von Mises.

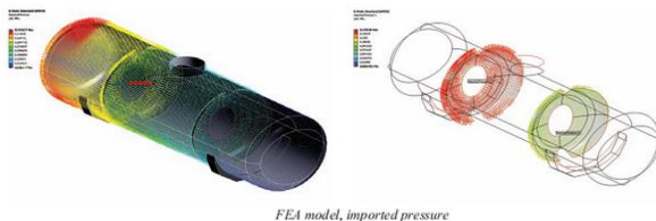


Figura 5.11 Presiuni importate în modulul de calcul structural[99]

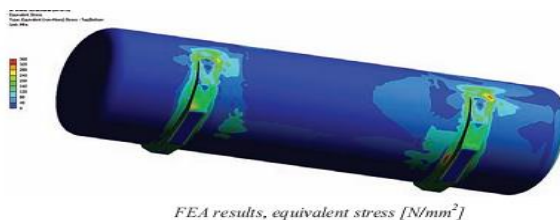


Figura 5.12 Tensiuni echivalente calculate[99]

Importante pentru noi nu sunt rezultatele obținute ci însăși procedura de calcul în Ansys pentru cuantificarea efectelor fenomenului de sloshing asupra structurii, procedură urmată în mod identic de noi.

- *Liquid sloshing in a moving rectangular container subjected to sudden impact* - Lyes Khezzar, Afshin Goharzadeh, Abdenmour Seibi, Mechanical Engineering Program The Petroleum Institute in Abu Dhabi P.O. Box 2533 United Arab Emirates, Marine Structures, 12, 2007[89]

Această lucrare „Sloshingul unui lichid în mișcare într-un rezervor paralelipipedic supus la impact” se concentrează pe studiul atât experimental cât și prin simulare numerică a formei suprafeței libere în cazul impactului unui container plin cu apă, iar studiul experimental s-a făcut pe un stand ca în figura 5.13.

Containerul paralelipipedic are pereții din plexiglass de dimensiuni 175x175x550 mm, acționat pe un plan orizontal de un troliu pe o masa cu role din plastic ca să se micșoreze frecarea.

Troliul este acționat de un sistem cu contragreutăți de la starea de repaos până la o anumită accelerație apoi un sistem de frânare simulează impactul brusc.

Lichidul este colorat și un sistem de camere vor înregistra forma suprafeței libere în timpul evoluției experimentului.

Pentru partea de simulare numerică s-a folosit softul Fluent care din 2008 a fost cumpărat de Ansys și încorporat.

La vremea respectivă Fluent era cel mai serios competitor al Ansys CFX, dar după „anexare” Fluent a rămas oarecum o rămășiță istorică dar încă foarte eficient și popular în analiza fenomenelor de combustie. Setările experimentale legate de suprafețele libere și modelul multifazic sunt identice cu cele presupuse de noi în lucrare.



Figura 5.13 Stand experimental[89]

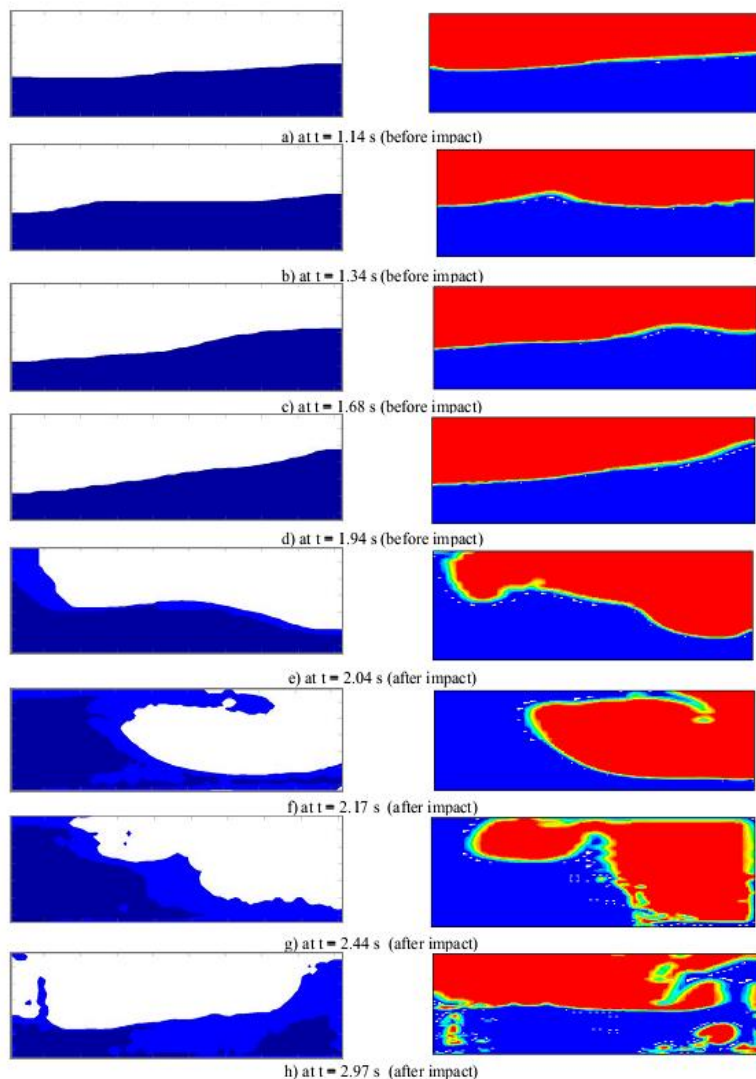


Figura 5.14 Comparație rezultate filmate și cele calculate la diferiți pași de timp, înainte și după impact[89]

Rezultatele experimentului atât real cât și numeric sunt suprapuse mai jos, fiind evidentă o excelentă corelare între formele suprafețelor libere filmate și cele calculate. Ca atare se demonstrează puterea CFD de a simula cu acuratețe evoluția fenomenelor de sloshing în tancurile/magaziile de marfă care conțin fluide.

- *Estimation of Structural Strength of Tanks under Sloshing Loads* – Soorya Elizabeth.G, Dr. Sheeja Janardhanan, M.Tech Student, Department of Civil Engineering, Associate Professor, Department of Mechanical engineering, SCMS School of Engineering and Technology, Karukutty, Kerala, India, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology Vol. 5, Issue 9, September 2016[124]

O lucrare foarte recentă din Septembrie 2016 este „Estimarea rezistenței structurale a tancurilor sub sarcina sloshingului” cea a Soorya Elizabeth G, și Dr. Sheeja Janardhanan citată mai sus, care implică un software ca al nostru cu versiunea ANSYS-15 și abordează implicarea sloshingului în mișcarea de lichid din interiorul unui tanc care este de obicei, în curs de mișcare. Fenomenul de sloshing este același deși autoarele îl studiază la nivel de tanc.

Ca în lucrarea mea atunci când are loc sloshingul există o presiune dinamică datorată interacțiunii dintre fluid și pereții rezervorului care provoacă o deformare de dimensiune mare în rezervor, precum și în structura de susținere.

La fel ca în cazul nostru s-a făcut o simulare computerizată a dinamicii fluidului (CFD) care oferă o imagine reală a fenomenului de sloshing în porțiunea interioară a tancurilor, iar această teză se concentrează asupra efectelor dinamice ale fenomenului de sloshing prin cuplarea CFD și a ANSYS Structural Solver. Utilizarea pereților despărțitori în interiorul tancurilor este de asemenea studiată și comparată cu tancurile în care acestea nu sunt utilizate. Deformarea structurală a tancurilor este studiată și rezultatele sunt verificate.

Autoarele se raportează la un model de tanc 3D cu dimensiunea 5x3x4,5 m și este modelat în ANSYS Fluent precum în figura 5.12, tancul este înconjurat de pereți pe toate laturile. Tancul este ulterior divizat în două porțiuni și anume: aer și apă. O interferență aer-apă este de asemenea prezentă în vederea separării celor două porțiuni.

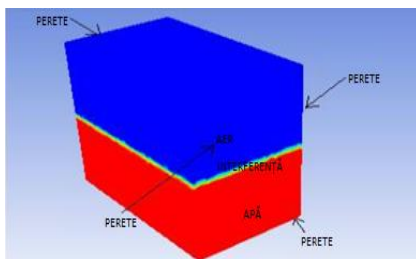


Figura 5.12 Condițiile limită ale tancului 3D[124]

În condiții de mare agitată, distribuțiile de presiune datorate sloshingului din tancurile navelor maritime au fost obținute în format 3D utilizând ANSYS Fluent, unde: t reprezintă perioada de timp a oscilației valului. Astfel, simulările 3D

pentru diferite perioade de timp ($t=0$ s, 0,25 s, 0,5 s, 0,75s și 1 s). Valorile distribuției presiunii sunt obținute din ANSYS Fluent (partea stângă a figurilor). Analiza structurală a tancurilor fără pereți despărțitori

Modelarea s-a realizat prin utilizarea ANSYS Structural Solver. Tancul 3D de dimensiunea $5 \times 3 \times 4,5$ m, având o grosime de 50 mm, este modelat utilizând ANSYS Structural Solver. Valorile sunt date de-a lungul pereților, iar pentru o citire concentrată a rezultatelor simulării la Secunda 7, în partea stângă a figurilor. Figura 5.13 prezintă distribuția presiunii tancului din ANSYS Fluent. În figura 5.14 sunt obținute datele de ieșire în urma analizei deplasării totale a tancului este obținută din ANSYS Structural Solver.

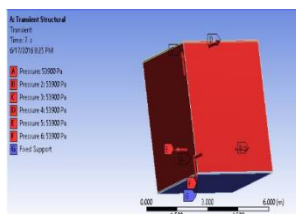


Figura 5.13 Distribuția presiunii în tanc[124]

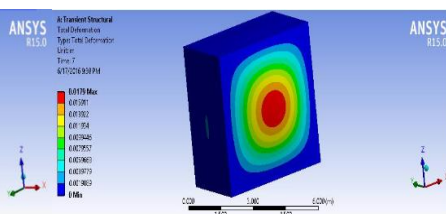


Figura 5.14 Deplasarea totală a tancului[124]

Analiza structurală este realizată utilizând presiunile indicate în figura de mai sus, iar răspunsurile structurale diferite, cum ar fi deplasarea, tensiunea von-Mises și deformarea von-Mises sunt obținute în figurile 5.15 și 5.16. Culoarea diferită indică variația din tanc.

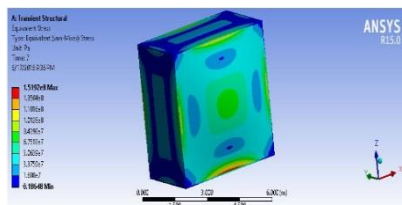


Figura 5.15 Tensiunea von-Mises a tancului[124]

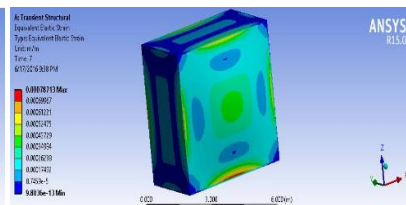


Figura 5.16 Deformația von-Mises a tancului[124]

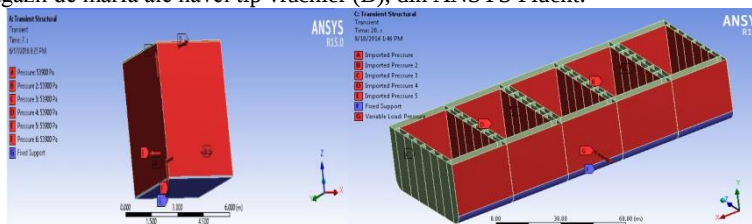
Metoda folosită aici, ca și la noi este o combinație a analizelor CFD și ANSYS Structural Solver este destul de eficientă în estimarea sarcinilor sloshingului și deformării structurilor. În ansamblu, lucrarea își atinge scopul în formarea codurilor comerciale ANSYS Fluent și Workbench pentru rezolvarea unei probleme dinamice referitoare la structuri.

Importante pentru noi este procedura de calcul în Ansys pentru cuantificarea efectelor fenomenului de sloshing asupra structurii, procedură urmată în mod similar și de noi. Interesante nu sunt pentru noi influența pereților

despărțitori asupra fenomenului de sloshing de vreme ce în simularea noastră, nu am considerat asemenea dispozitive, ci analiza structurală a tancurilor fără pereți despărțitori, la fel ca și în situația noastră.

Validarea calitativă sa realizat prin comparare cu lucrarea „Estimarea rezistenței structurale a tancurilor sub sarcina sloshingului”, iar în ceea ce privește: Condițiile la frontiere aplicate, Deplasarea totală, Deformația elastică echivalentă von-Mises și Tensiunea echivalentă von-Mises, autoarele lucrării găsesc configurații asemănătoare cu cele realizate de noi.

În cele două lucrări (A - Rezultatele lucrării citate și B - Rezultatele lucrării proprii) modelarea tancului și a celor cinci magazii de marfă ale navei tip vrachier sa realizat, prin utilizarea ANSYS Structural. În figura 5.19 condițiile la frontiere aplicate se prezintă prin comparație distribuția presiunii tancului (A) și a celor cinci magazii de marfă ale navei tip vrachier (B), din ANSYS Fluent.

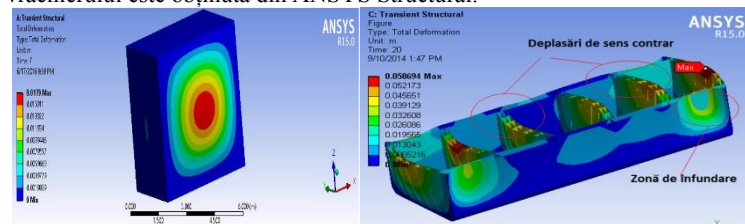


A - Rezultatele lucrării citate

B - Rezultatele lucrării proprii

Figura 5.19 Condițiile la frontiere aplicate

În figurile 5.20 sunt obținute datele de ieșire în urma analizei deplasări totale al tancului în comparație cu deplasarea totală a celor cinci magazii de marfă ale vrachierului este obținută din ANSYS Structural.

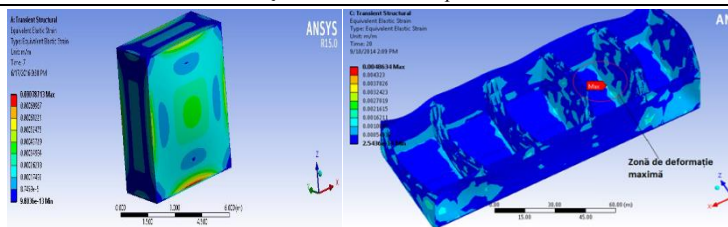


A - Rezultatele lucrării citate

B - Rezultatele lucrării proprii

Figura 5.20 Deplasarea totală

Analiza structurală atât a tancului cât și analiza structurală a magaziiilor de marfă ale navei tip vrachier este realizată prin comparație utilizând presiunile indicate în figurile de mai sus, iar răspunsurile structurale diferite, cum ar fi deplasarea, deformația elastică echivalentă von-Mises și tensiunea echivalentă von-Mises sunt obținute în figurile 5.21 și 5.22. Culoarea diferită indică variația atât din tancul lucrării citate, cât și a magaziiilor de marfă ale vrachierului din lucrarea noastră.

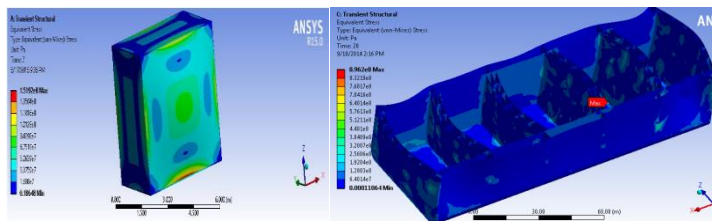


A – Rezultatele lucrării citate

B - Rezultatele lucrării proprii

Figura 5.21 Deformația elastică echivalentă von-Mises

În mod identic cu procedura noastră, presiunile calculate sunt importate în modul de calcul structural. Astfel importate în modulul de calcul structural, efectele presiunii sunt contorizate ca efecte asupra structurii tancului și celor cinci magazii de marfă ale vrachierului, vezi în figura 5.22 pentru tensiunile echivalente von-Mises.



A - Rezultatele lucrării citate

B - Rezultatele lucrării proprii

Figura 5.22 Tensiunea echivalentă von-Mises

Comparațiile sau făcut cu valorile date de-a lungul pereților, fiind compatibile și diferite datorită perioadei de timp, pentru o citire concetrată a rezultatelor simulării lucrării citate la Secunda 7, iar pentru o citire concetrată a rezultatelor simulării lucrării noastre la Secunda 20.

De aici rezultă că perioada noastră de timp este de aproape trei ori mai mare decât a celor două autoare a lucrării citate, iar geometriile nu sunt aceleași având dimensiuni diferite, dar se va vedea că abordarea este simetrică, iar din punct de vedere calitativ lucrarea noastră a generat rezultate credibile.

Rezultate simulare structurală A - Lucrarea citată

Pentru o citire concentrată rezultatele simulării (Secunda 7) sunt date tabelar mai jos:

Nume obiect	Deformație totală	Deformație echivalentă totală	Tensiune echivalentă
Minim	0. m	9.8036e-013 mm	0.1588e7 Pa
Maxim	0.0179 m	0.00078713 mm	1.5192e8 Pa

Tabel 5.3 Rezultate maxime și minime

Rezultate simulare structurală B - Rezultatele obținute la Scenariul 1 - Toate magazinele de marfă balastate 50%

Pentru o citire concentrată rezultatele simulării (Secunda 20) sunt date tabelar mai jos:

Nume obiect	Deformație totală	Deformație echivalentă totală	Tensiune echivalentă
Minim	0. m	1.9262e-015 mm	4.7555e-005 Pa
Maxim	4.1214e-002 m	4.1965e-003 mm	4.8284e+008 Pa

Tabel 5.4 Rezultate maxime și minime

Rezultatele obținute pe durata simulărilor efectuate sunt compatibile perfect cu rezultatele din lucrarea citată, iar geometriile de lucru și perioada de timp fiind diferite vor avea alte valori. După cum se poate vedea importante pentru noi sunt atât procedura de calcul în ANSYS, cât și însăși rezultatele obținute pentru cuantificarea efectelor fenomenului de sloshing asupra structurii, procedură urmată în mod identic de noi.

Ca atare se demonstrează puterea CFD de a simula cu acuratețe evoluția fenomenelor de sloshing în tancurile/magaziile de marfă care conțin apă sau fluide. Studiul sloshingului este foarte complex, iar montajul experimental atrage după sine un tabel de oscilații pentru stimularea tancului sau a magaziiilor de marfă în direcția dorită. Cu toate acestea, capturarea profilului suprafeței libere utilizând tehnici convenționale nu este fezabilă iar părțile induse metodelor măsurării vitezei fluidelor (PIV – Particle induced velocimetry) sunt foarte scumpe.

De aici apare nevoia computerizării metodelor numerice ale dinamicii fluidelor (CFD), iar simulările CFD sunt realizate în trei stagii: preprocesare, soluție și postprocesare. În prezenta lucrare, modelarea și angrenarea, o parte a preprocesării, a fost efectuată folosind ANSYS CFD, iar cealaltă parte a preprocesării, soluția și postprocesarea au fost efectuate utilizând ANSYS Fluent.

5.3 Concluzii Capitolul 5

Sistemul modelat prin analiză numerică este un fenomen complex în care valurile mării mișcă nava tip vrachier într-un anumit fel, apoi pereții magaziiilor/hambarelor de marfă mișcă apa sau marfă fluidă sau pulverulentă precum bauxita și în fine fenomenul de sloshing soliciță structura navei vrachier, deseori peste capacitatea ei, iar toate aceste etape sunt cel mai bine studiate în această teză.

Din studiile efectuate în prezenta lucrare, se poate concluziona că, sloshingul este un fenomen dinamic care poate fi studiat folosind simulările dinamice ale pachetului comercial CFD ANSYS Fluent.

Procedeul utilizat din combinația analizelor CFD și ANSYS Structural este eficientă cu acuratețe în evoluția și estimarea fenomenelor de sloshing și deplasările structurii celor cinci magazine de marfă care conțin apă de mare (la traversadă) sau marfă fluidă sau pulverulentă precum bauxita ale navei tip vrachier.

Deformările structurii navei tip vrachier în termeni de grosime, material și configurație, excitațiile venite dinspre mediul marin și efectul de sloshing cu simularea și generarea valului intern din interiorul magaziiilor de marfă ale vrachierului au fost capturate utilizând ANSYS.

În procesul de proiectare al corpului navei tip vrachier, este esențială includerea fenomenului de sloshing, iar buna proiectare având impact asupra dezvoltării fisurilor și propagării acestora în structură, iar zonele de trecere de la pereții magaziiilor de marfă la fundul navei tip vrachier, trebuie ranforsată și reproiectată pentru eliminarea concentratorilor puternici de tensiuni având consecințe asupra duratei de viață a navei tip vrachier.

Sloshingul poate cauza pierderi foarte mari de vieți omenești, de resurse economice și de mediu, datorate fisurării structurii navei vrachier, iar sistemul ecologic marin poate fi distrus în urma poluării oceanelor sau a apei de mare.

6. CONCLUZII FINALE

Vrachierele sunt suplimentar încărcate de instabilitatea mărfii care datorită elementelor de excitație venite din mediul marin pot determina apariția unor fenomene de sloshing.

Problematika prezenței apei în spațiile (magaziile/hambarele) de marfă trebuie abordată din două puncte de vedere în cazul navelor tip vrachier. Astfel prima abordare este când apa din magazii se datorează inundării accidentale a acesteia sau datorită umidității din marfa transportată, care poate produce lichefierea mărfii, și duce la scăderea considerabilă a stabilității navei vrachier, iar cea de a doua abordare este cea în care apa este încărcată în magaziile de marfă în vederea satisfacerii cerințelor de stabilitate ale navei vrachier.

Indiferent de condiția prin care apa se găsește în magaziile navei specializate tip vrachier, această ridică anumite probleme, cum ar fi efectul asupra structurilor învecinate, a rezistenței structurale a corpului navei tip vrachier și stabilitatea pozitivă a navei vrachier, mai cu seamă datorate fenomenului de sloshing. În ceea ce privește fenomenul de sloshing, în această lucrare s-a urmărit analiza numerică a dinamicii mișcării fluidului din magaziile/hambarele de marfă și interacțiunea cu elementele de structură ale navei.

Concluziile cele mai importante sunt după cum urmează:

1. Sistemul modelat prin analiză numerică este fără îndoială un fenomen complex. În cuvinte simple valurile mării mișcă nava tip vrachier într-un anumit fel, apoi pereții magaziiilor de marfă mișcă apa sau marfa fluidă (sau pulverulentă precum bauxita) și în fine fenomenul de sloshing solicită structura navei vrachier deseori peste capacitatea ei. Toate aceste etape au fost parcurse în capitolele prezentate.

2. Nu doar fluidele ca atare suferă fenomenul de sloshing, dar și cele pulverulente (tip bauxită) vor dezvolta același fenomen ceea ce vine în linie cu ceea ce a arătat Lee et al., 2007, care a realizat un studiu de sensibilitate a parametrilor pentru un tanc LNG folosind CFD (Dinamica Fluidelor asistată de Calculator) cu concluzia că vâscizitatea și densitatea fluidelor simulate nu au un efect sensibil asupra fenomenelor de sloshing.

3. În schimb densitatea și forțele de presiune dezvoltate în cursul evoluției fluidului în tanc, au un efect important asupra frecărilor cu pereții tancurilor și implicit asupra tensiunilor de forfecare care se dezvoltă la nivelul interfețelor dintre fluid și pereți.

4. Mai mult, s-a arătat că în procesul de proiectare al corpului navei tip vrachier, este esențială considerarea fenomenului de sloshing, buna proiectare având un impact serios asupra dezvoltării fisurilor și propagării acestora în structură, cu consecințe asupra duratei de viață a navei tip vrachier.

5. Printre factorii care contribuie la deplasarea mărfurilor din interiorul magaziiilor de marfă al vrachierului, se pot menționa: deplasările provocare de valurile care lovesc nava tip vrachier și induc mișcările de ruli și tangaj într-o mare agitată; greșelile de stivuire și amarare a mărfurilor; fricțiunile necorespunzătoare dintre marfă (bauxită, minereu de fier, cărbune, sare, cereale vrac, etc.) și pereții magaziiilor navei vrachier, capacele gurilor de magazii, suprafețele libere lichide ce pot apare ca urmare a consumului de combustibil, apă și uleiuri.

6. În concluzie, navigația pe valuri a căror lungime este mică în comparație cu lungimea vrachierului, este însoțită de oscilații longitudinal-verticale ușoare și nu necesită luarea unor măsuri speciale pentru reducerea valurilor și a parametrilor acestora. Valurile de lungime mică, pot însă produce și întreține vibrațiile generale ale corpului vrachierului, privit ca un sistem elastic complex, iar Sloshingul poate cauza pierderi foarte mari de vieți omenești, de resurse economice și de mediu, datorate fisurării structurii navei tip vrachier, iar sistemul ecologic marin poate fi distrus în urma poluării oceanelor sau a apei de mare.

7. CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI RECOMANDĂRI PENTRU LUCRĂRILE VIITOARE

7.1 Contribuții personale

În cadrul acestei teze de doctorat, autorul a dezvoltat o serie de elemente originale, care constituie contribuțiile sale personale:

1. Realizarea unui studiu privind elementele specifice metodei elementului finit aplicate în hidrodinamică. Acest studiu, deși nefiind exhaustiv dată fiind magnitudinea subiectului, face o trecere în revistă a principalelor probleme ale simulării cu volume finite ale comportamentului unei chile de navă vrachier plecând de la generarea modelului geometric și terminând cu analiza rezultatelor ținând de mecanica fluidelor în diverse puncte ale chilei. Această primă etapă are ca obiect explicit determinarea pozițiilor, vitezelor și accelerațiilor pe care elementele de excitație marină (valuri și vânt) le au asupra cinematicii și dinamicii navei. Aceste date calculate vor fi folosite în cea de-a doua etapă de simulare, și anume simulare interacțiunii valului intern dat de sloshing cu structura navei.

2. Studiul amplu privind comportamentul navei de tip vrachier (bulk carrier) în diferite condiții de încărcare. Condițiile de încărcare pot fi diverse, iar modul de rezolvare poate fi acomodat pentru oricare dintre scenariile imaginabile, fie în ceea

ce privește parametrii de excitație venind din mediul marin fie ca grad de umplere a diverselor magazii, fie ca tip de fluid cercetat. Ceea ce este important este că metoda descrisă poate fi folosită cu minime modificări la oricare dintre scenariile pe care arhitectul naval dorește să-l investigheze.

3. Conceperea unui model complex 3D al pereților navei tip vrachier prin modelarea cu volume finite cu scopul de a scoate în evidență comportarea acestor pereți când la bordul navei vrachier apare efectul de sloshing datorat suprafețelor libere lichide din magaziile de marfă ale navei. Modelul obținut folosește un software avansat de generare 3D precum SolidWorks care a fost apoi importat în Ansys pentru analiza detaliată a fenomenului de interacțiune fluid structură.

4. Realizarea unui studiu amplu privind răspunsul structural al pereților transversali ai magaziilor de marfă datorită impactului suprafețelor libere lichide.

4.1 Prima etapă a acestui studiu constă în modelarea geometrică (CAD) și analiza numerică cu Ansys CFX. Ca în orice cercetare se pleacă de la un model real fără a se pierde însă din gradul de generalitate al cercetării. Nava aleasă pentru cercetarea noastră este o navă tip vrachier cu următoarele caracteristici: Lungime = 290 m, Lățime = 32 m, Pescaj = 11,1 m, Deadweight = 57.700 t, Motor MAN B&W 6S50MC = 8.200 kW, Grosime tablă oțel = 22 mm. Desenul acestei nave tip vrachier și folosind SolidWorks 2014 s-a generat modelul geometric CAD al navei vrachier prezentat în figura 3.8.

4.2 Etapa a doua a studiului constă în simularea numerică a efectului suprafețelor libere lichide la bordul navei, realizându-se un număr de trei scenarii în acest sens. În stabilirea parametrilor folosiți pentru simulare s-a considerat faptul că pe timpul apariției fenomenului de sloshing, magaziile navei vrachier sunt balastate sau încărcate la diferite valori. Cazurile de simulare au fost procesate, după cum urmează:

- Numerotarea magaziilor de marfă din prova (partea din față) la pupa (partea din spate): 1-5
 - Marfă: Bauxită, densitate = 3,2 t/m³; vâscozitate = 11,70 cSt
 - Cazul 1
- Toate magaziile de marfă ale vrachierului balastate 50%.
- Cazul 2

Marfă în magaziile vrachierului, astfel:

- magaziile de marfă: 1, 3 și 5 = 50% încărcate cu bauxită;
- magaziile de marfă: 2 și 4 = 65% încărcate cu bauxită.

5. Studiul efectuat a arătat efectele diversilor factori care influențează dinamica structurii navei tip vrachier și răspunsul acesteia printre care gradul de umplere al magaziilor/hambarelor de marfă, structura pereților lor în termeni de grosime, material și configurație, excitațiile venite dinspre mediul marin și efectul de sloshing cu simularea și generarea valului intern din magaziile/hambarele de marfă. Punctul terminus al cercetării a fost evaluarea acestor tensiuni apărute în structură și evaluarea efectelor lor asupra integrității structurii și implicit ale navei tip vrachier.

6. Validarea tehnicii de modelare. Modelul numeric a fost comparat cu un

model de tanc/magazie de marfă în formă paralelipipedică cu dimensiunile 5x4,5x3m. Simularea numerică s-a realizat cu ajutorul softului ANSYS Fluent, iar utilizarea ANSYS Structural cu date de intrare din datele de ieșire CFD pentru calculul comportamentului structural al tancului și al magaziiilor de marfă al navei tip vrachier. Rezultatele simulării experimentale au scos în evidență că sloshingul este un fenomen dinamic care poate fi studiat folosind simulările dinamice ale pachetului CFD și ANSYS Fluent, demonstrându-se puterea CFD de a simula cu acuratețe evoluția fenomenului de sloshing în tancuri sau magazinele de marfă ale navei tip vrachier, iar deformările structurii tancului și vrachierului supuse fenomenului de sloshing au fost capturate utilizând ANSYS.

7.2 Recomandări pentru lucrările viitoare

Lucrarea de față deschide o certă varietate de posibilități legate de eventuale studii și cercetări ce pot fi realizate în viitor, plecând de la prezenta lucrare.

Ele sunt date mai jos fără a avea nici o pretenție la exhaustivitate:

- Având în vedere geometria complexă existentă la diferitele tipuri de navă vrachier, se va avea în vedere dezvoltarea acestui studiu și realizarea de simulări ale fenomenului de sloshing, cât mai apropiate de aceste noi cazuri.
- Realizarea unor studii de optimizare și rafinare a soluțiilor constructive ale structurii magaziiilor navelor vrachier prin definirea și analiza cazului cel mai rău (worst case scenario).
- O direcție viitoare de cercetare foarte importantă este studiul și cercetările testelor de bazin, care ar reprezenta o imperioasă necesitate.

BIBLIOGRAFIE

- [1] *Abdel, G.A.F., Ragab, S.A., Nayfeh, A.H. and Mook, D.T.*, Roll stabilization by anti-roll passive tanks. *Ocean Engineering*, 28, 457-469, 2001.
- [2] *Amabili, M.*, Eigenvalue problems for vibrating structures coupled with quiescent fluids with free surface. *Journal of Sound and Vibration*, 231(1), 79-97, 2000.
- [3] *Amabili, M., Païdoussis, M.P. and Lakis, A.A.*, Vibrations of partially filled cylindrical tanks with ring-stiffeners and flexible bottom. *Journal of Sound and Vibration*, 213(2), 259-299, 1998.
- [4] *Anderson, J.G., Turan, O.F. and Semercigil, S.E.* (2001). Experiments to control sloshing in cylindrical containers. *Journal of Sound and Vibration*, 240(2), 398-404.
- [5] *Andrei C.* – „Stabilitatea și asieta navei”, Universitatea Maritimă Constanța, 2013.
- [6] *Andrei, C., Lamba, M.D., Hanzu-Pazara, R.*, Behind the Theory of Safety Against Capsizing and Assessing Ship Stability, *Constanta Maritime University Annals*, Year XIII, vol. 18, 25–30, 2012.

- [7] *Andrei, C., Lamba, M.D., Hanzu-Pazara, R.*, The Influence of Liquid Free Surface on Ship Stability, *Constanta Maritime University Annals*, Year XIV, vol. 19, 21–26, 2013.
- [8] *Andrei, C., Belev, B., Lamba, M.D.*, Considerations on Broaching Phenomenon and its Influence on Loss of Ship Stability in Following Seas, *Constanta Maritime University Annals*, Year XIV, vol. 20, 13–16, 2013.
- [9] *Andrei, C., Lamba, M.D.*, Shifting of Cargo on Board Ships, a Serious Threat to Loss of Intact Stability, *Constanta Maritime University Annals*, Year XV, vol. 21, 11–14, 2014.
- [10] *Andrei, C., Lamba, M.D.*, Surf-riding of a Ship in Following and Quartering Waves and Vulnerability to Loss of Intact Stability, *Constanta Maritime University Annals*, Year XV, vol. 21, 15–18, 2014.
- [11] *Andrei, C., Lamba, M.D., Hanzu-Pazara, R., Belev, B.*, Considerations Regarding the Impact of Ship Intact Stability Loss on Marine Pollution, *Journal of Marine Technology and Environment*, Vol.1, 7–16, 2014.
- [12] *Andrei, C., Lamba, M.D., Hanzu-Pazara, R.*, A Proposed Criterion for Assessment the Pure Loss of Stability of Ships in Longitudinal Waves, *U.P.B. Sci. Bull., Series D*, Vol. 77, Iss. 2, 83-96, 2015.
- [13] *Andrei, C., Lamba, M.D., Hanzu-Pazara, R.*, Considerations Regarding Ships Stability Loss in Severe Sea Conditions and the Impact on Safety of Navigation, *Constanta Maritime University Annals*, Year XVI, vol. 24, 2015.
- [14] *Arai, M.*, Experimental and numerical studies of sloshing in liquid cargo tanks with internal structures. *Ishikawajima-harima Heavy Industrial Engineering Review*, 19(2), 51-56, 1986.
- [15] *Arsenie, A., C., Jenaru, M., Lamba, M.D., Martinas, G.*, Stability and Recovery Measures After the Ship Stability was Damage, *Constanta Maritime University Annals*, Year XV, vol. 21, 19–24, 2014.
- [16] *Arsenie, A., C., Hanzu-Pazara, R., Varsami, A., Tromiadis, R., Lamba, M.D.*, A Comparative Approach of Electrical Diesel Propulsion System, *Safety of Marine Transport*, 185-189, 2015.
- [17] *Aslam, M.*, Finite element analysis of earthquake-induced sloshing in axisymmetric tanks. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 17, 159-170, 1981.
- [18] *Balchen, J.G., Jenssen, N.A., Mathisen, E. and Sælid, S.*, A dynamic positioning system based on Kalman filtering and optimal control. *Modeling, Identification and Control*, 1(3), 135-163, 1980.
- [19] *Balendra, T. and Nash, W.A.*, Seismic analysis of a cylindrical liquid storage tank with a dome by finite element method. *Century 2, Pressure Vessels and Piping Conference*, San Francisco, USA, 1980.
- [20] *Balendra, T., Ang, K.K., Paramasivam, P. and Lee, S.L.*, Free vibration analysis of cylindrical liquid storage tanks. *International Journal of Mechanical Sciences*, 24(1), 47-59, 1982a.
- [21] *Balendra, T., Ang, K.K., Paramasivam, P. and Lee, S.L.*, Seismic design of flexible cylindrical liquid storage tanks. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 10, 477-496, 1982b.

- [22] *Barrass C.B.* – „Ship stability for Masters and Mates”, Elsevier Ltd., Oxford, 2004.
- [23] *Bass, D.W.*, Roll stabilization for small fishing vessels using paravanes and anti-roll tanks. *Marine Technology*, 35(2), 74-84, 1998.
- [24] *Bass, R.L.*, Dynamic slosh induced loads on liquid cargo tank bulkheads. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Report No. R-19, 1975.
- [25] *Bathe, K.J.*, (1996). *Finite Element Procedures*. Prentice-Hall, New Jersey.
- [26] *Bermudez, A., Rodriguez, R. and Santamarina, D.*, Finite element computation of sloshing modes in containers with elastic baffle plates. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 56, 447-467, 2003.
- [27] *Beziris A., Bamboi Gh.* – „Transportul maritim, probleme tehnice și de exploatare”, vol. I, II, Editura Tehnică, București, 1988.
- [28] *Bidoaie R., Ionaș O.* – „Arhitectura navei”, Editura Didactică și Pedagogică, București, 2004.
- [29] *Biswal, K.C., Bhattacharyya, S.K. and Sinha, P.K.*, Free-vibration analysis of liquid-filled tank with baffles. *Journal of Sound and Vibration*, 259(1), 177-192, 2003.
- [30] *Biswal, K.C., Bhattacharyya, S.K. and Sinha, P.K.*, Dynamic response analysis of a liquid-filled cylindrical tank with annular baffle. *Journal of Sound and Vibration*, 274, 13-37, 2004.
- [31] *Biswal, K.C., Bhattacharyya, S.K. and Sinha, P.K.*, Non-linear sloshing in partially liquid filled containers with baffles. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 68, 317-337, 2006.
- [32] *Buzhinskii, V.A.*, The energy of vortex formation for oscillations in a fluid of a body with sharp edges. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 313(2), 1072-1074, 1990.
- [33] *Buzhinskii, V.A.*, Vortex damping of sloshing in tanks with baffles. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 62, 217-224, 1998.
- [34] *Chang, J.S. and Chiou, W.J.*, Natural frequencies and critical velocities of fixed-fixed laminated circular cylindrical shells conveying fluids. *Computer & Structures*, 57, 929-939, 1995.
- [35] *Cho, J.R., Kim, K.W., Lee, J.K., Park, T.H. and Lee, W.Y.*, Axisymmetric modal analysis of liquid-storage tanks considering compressibility effects. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 55, 733-752, 2002a.
- [36] *Cho, J.R., Lee, H.W. and Ha, S.Y.*, Finite element analysis of resonant sloshing response in 2-D baffled tank. *Journal of Sound and Vibration*, 288, 829-845, (2005).
- [37] *Cho, J.R., Lee, H.W. and Kim, K.W.*, Free vibration analysis of baffled liquidstorage tanks by the structural-acoustic finite element formulation. *Journal of Sound and Vibration*, 258(5), 847-866, 2002b.
- [38] *Chopra, A.K.*, *Dynamics of Structures*. Prentice Hall, 1995.
- [39] *Dean, R.G. and Dalrymple, R.A.*, *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. World Scientific, Singapore, 1991.

- [40] Derret D.R.t, *Captain* – „Ship stability for Masters and Mates”, fifth edition, Butterworth Heinmann Publishing, London, 2005.
- [41] Drazin P.G., Reid, W.H. – „Hydrodynamic Stability”, Cambridge University Press, Cambridge, 1981.
- [42] E. O. Tuck, D. C. Scullen, and L. Lazausk, (The University of Adelaide, Australia), Wave Patterns and Minimum Wave Resistance for High-Speed Vessels, 24th Symposium on Naval Hydrodynamics Fukuoka, JAPAN, 8-13 July 2002.
- [43] Ernest, H., Johann, S. and Mustafa, O., Analysis and Optimization of Prismatic and Axisymmetric Shell Structures. Springer Verlag, London, UK, 2003.
- [44] Eyres D.J. – „Ship Construction”, 6th Edition, Elsevier Ltd, Oxford, 2007.
- [45] Faltinsen O. M., Rognebakke O.F., Timokha A.N. – „Resonan three dimensional nonlinear sloshing in a square base basin: Effect of higher modes”, Journal of Fluid Mechanics, London, 2005.
- [46] Faltinsen, O.M., Rognebakke, O.F. and Timokha, A.N., Classification of threedimensional nonlinear sloshing in a square-base tank with finite depth. Journal of Fluids and Structures, 20, 81-103, 2005.
- [47] Faltinsen, O.M., A numerical nonlinear method of sloshing in tanks with twodimensional flow. Journal of Ship Research, 18(4), 224-241, 1978.
- [48] Faltinsen, O.M., Sea Loads on Ships and Offshore Structures. Cambridge University Press, UK, 1990.
- [49] Faltinsen, O.M. and Løken, A.E., Slow-drift oscillations of a ship in irregular wave. Applied Ocean Research, 1(1), 21-31, 1979.
- [50] Fossen, T.I., Marine Control Systems. Tapir Trykkeri, Trondheim, Norway, 2nd Edition, 2002.
- [51] Frandsen, J.B., Sloshing motions in excited tanks. Journal of Computational Physics, 196, 53-87, 2004.
- [52] Frieze P.A., Paik J.K – „General requirements for limit state assessment of ship structures”, SNAME Transactions, 2004.
- [53] Froude, W., Considerations respecting the rolling of ships at sea. Transactions of the Institute Naval Architecture, 14, 96-116, 1874.
- [54] Gavriluk, I., Lukovsky, I., Trotsenko, Y. and Timokha, A., Sloshing in a vertical circular cylindrical tank with an annular baffle. Part 1. Linear fundamental solutions. Journal of Engineering Mathematics, 54, 71-88, 2006.
- [55] Gedikli, A. and Ergüven, M.E., Seismic analysis of a liquid storage tank with a baffle. Journal of Sound and Vibration, 223(1), 141-155, 1999.
- [56] George, Z.V. and Pawel, W., A refined theory for thick spherical shells. International Journal of Solids Structure, 41, 3747-3769, 2004.
- [57] Geradin, M. and Rixen, D., Mechanical Vibrations and Structural Dynamics. John Wiley, 1994.
- [58] Haroun, M.A. and Housner, G.W., Seismic design of liquid storage tanks. Journal of Technical Councils of ASCE, 107, 191-207, 1981a.
- [59] Haroun, M.A. and Housner, G.W., Earthquake response of deformable liquid storage tanks. Journal of Applied Mechanics, 48, 411-418, 1981b.

- [60] Haroun, M.A. and Housner, G.W., Dynamic characteristics of liquid storage tanks. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 108, 783-800, 1982.
- [61] Hirt C W, Nichols B D. „Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries.” *Journal of Computational Physics*, 39, 201-225, 1981.
- [62] Hsiung, H.C.H. and Weingarten, V.I., Dynamic analysis of hydro-elastic systems using the finite element method. Report USCCE013, Department of Civil Engineering, University of Southern California, USA, 1973.
- [63] Ibrahim, R.A., *Liquid sloshing dynamics: Theory and applications*. Cambridge University Press, UK, 2005.
- [64] Jack I. – „Bulk Carrier Practice – A practical guide”, The Nautical Institute, UK, 1993.
- [65] Jing, H.S. and Tzeng, K.G., Refined shear deformation theory of laminated shells. *American Institute of Aeronautics and Astronautics AIAA Journal*, 31, 765-773, 1993.
- [66] Jones N. – „Structural impact”, Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
- [67] Joseph, W.T., William, G., McDougal, C. Allen, Ross, *Addison-Wesley*, Structural Dynamics, 1999.
- [68] Journee, J.M.J., Liquid cargo and its effect on ship motions. Six International Conference on Stability of Ships and Ocean Structures, Varna, Bulgaria, 22-27, 1997.
- [69] Karsten Hochkirch, *FutureShip*, Potsdam/Germany, Benoit Mallol, Numeca, Brussels/Belgium, On the Importance of Full-Scale CFD Simulations for Ships, <http://www.numeca.com/sites/numeca/files/>.
- [70] Khai, S.L., Seismic coupled modeling of axisymmetric tanks containing liquid, *Journal of Engineering Mechanics*, 119(9), 1747-1761, 1993.
- [71] Kim, J.W., Kim, K., Kim, P.S. and Shin, Y.S., Sloshing-ship motion coupling effect for the sloshing impact load on the LNG containment system. *Proceedings of the Fifteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, Seoul, Korea, 3, 282-291, 2005.
- [72] Kim, Y., A numerical study on sloshing flows coupled with ship motion – the anti-rolling tank problem. *Journal of Ship Research*, 46(1), 52-62, 2002.
- [73] Kim, Y., Nam, B.W., Kim, D.W. and Kim, Y.S., Study on coupling effects of ship motion and sloshing. *Ocean Engineering*, 34, 2176-2187, 2007.
- [74] Kim, Y., Nam, B.W., Kim, D.W., Lee, Y.B. and Lee, J.H., Study on couple effects of sloshing and ship motion. *Proceedings of the Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, San Francisco, California, USA, 3, 225-229, 2006.
- [75] Kim, Y.S. and Yun, C.B., A spurious free four-node displacement-based fluid element for fluid-structure interaction analysis. *Engineering Structures*, 19(8), 665-678, 1997.
- [76] Kumar, R.R. and Rao, Y.V.K.S., Free vibration of multilayered thick composite shells. *Computer & Structures*, 28(6), 717-722, 1988.
- [77] Kyeong, H.J. and Seong, C.L., Fourier series expansion method for free vibration analysis of either a partially liquid-filled or a partially

liquidsurrounded circular cylindrical shell. *Computers & Structures*, 58(5), 931-946, 1995.

[78] Kyeong, H.J. and Seong, C.L., Hydroelastic vibration of a liquid-filled circular cylindrical shell. *Computers & Structures*, 66(2-3), 173-185, 1998.

[79] Lam, K.Y. and Wu, Q., Vibrations of thick rotating laminated composite cylindrical shells. *Journal of Sound and Vibration*, 225(3), 483-501, 1999.

[80] Lamba, M.D., Andrei, C., Hanzu-Pazara, R., The Analysis of Intact Ship Stability Regulations, *Constanta Maritime University Annals*, Year XIII, vol. 18, 45-48, 2012.

[81] Lamba, M.D., Barsan, E., Varsami, C., Arsenie, A., Simulations Performed on a Bulk Carrier in Order to Analyze the Ship's, *IMAM*, 717-724, 2015.

[82] Lamba, M.D., Chircor, M., Andrei, C., Numerical Analysis of a Cargo Vessel Motion, *Constanta Maritime University Annals*, Year XVI, vol. 24, 41-46, 2015.

[83] Lamba, M.D., Duse, A., Varsami, C., Hanzu-Pazara, R., Interaction Between Motion of Free Fluid Surfaces and Ships Motions, *ModTech International Conference*, 2017. (în curs de publicare).

[84] Lee, D.H., Kim, M.H., Kwon, S.H., Kim, J.W. and Lee, Y.B., A parametric sensitivity study on LNG tank sloshing loads by numerical simulations. *Ocean Engineering*, 34, 3-9, 2007a.

[85] Lee, D.Y. and Choi, H.S., Study on sloshing in cargo tanks including hydroelastic effects. *Journal of Marine Science and Technology*, 4, 27-34, 1999.

[86] Lee, S.J., Kim, M.H., Lee, D.H., Kim, J.W. and Kim, Y.H., The effects of LNG-tank sloshing on the global motions of LNG carriers. *Ocean Engineering*, 34, 10-20, 2007b.

[87] Love, A.E.H., *A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity*. Dover Publications, 4th Edition, New York, 1944.

[88] Loy, C.T. and Lam, K.Y., Vibration of thick cylindrical shells on the basis of three dimensional theory of elasticity. *Journal of Sound and Vibration*, 226(4), 719-737, 1999.

[89] Lyes Khezzar, Afshin Goharzadeh, Abdenmour Seibi, Mechanical Engineering Program The Petroleum Institute in Abu Dhabi P.O. Box 2533 United Arab Emirates, Liquid sloshing in a moving rectangular container subjected to sudden impact, *Marine Structures*, 12, 183-198, 2007.

[90] Ma, D.C., Gvildys, J., Chang, Y.W. and Liu, W.K., Seismic behavior of liquidfilled shells. *Nuclear Engineering and Design*, 70, 437-455, 1982.

[91] Ma, Y.Q. and Ang, K.K., Free vibration of Mindlin plates based on the relative displacement plate element. *Finite Element in Analysis and Design*, 42, 1021-1028, 2006.

[92] Ma, Y.Q., Ang, K.K. and McGuckin, D., A plate element based on relative displacement concept. *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, 6(3), 153-159, 2005.

[93] MacElrevey D.H. – „Shiphandling for the Mariner”, 3rd Edition, Cornell Maritime Press, Centreville, 1998.

- [94] Madsen H.O., Krenk S., Lind N.C. – „Methods of structural safety”, Englewood Cliffs, UK, 1986.
- [95] Maier Viorel – „Mecanica și construcția navei”, vol. I, II, III, Editura Tehnică, București, 1999.
- [96] Maleki, A. and Ziyaeifar, M., Damping enhancement of seismic isolated cylindrical liquid storage tanks using baffles. *Engineering Structures*, 29(12), 3227-3240, 2007.
- [97] Maleki, A. and Ziyaeifar, M., Sloshing damping in cylindrical liquid storage tanks with baffles. *Journal of Sound and Vibration*, 311(1-2), 372-385, 2008.
- [98] Malenica, S., Zalar, M. and Chen, X.B., Dynamic coupling of seakeeping and sloshing. *Proceedings of the 13th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Hawaii, USA, 3, 484-490, 2003.
- [99] Mariusz Domagała, Edward Lisowski, Cracow University of Technology, Department of Mechanical Engineering Jana Pawła II Street 37, 31-864 Kraków, Poland, Interaction of liquid motion on mobile tank structure, *Journal of KONES Powertrain and Transport*, Vol. 18, No. 3, 2011.
- [100] Martinas, G., Stan, L.C., Arsenie, A., **Lamba, M.D.**, The Influence of a Wake Equalizing Duct Over the Cavitation of a Maritime Ship Propeller, *Constanta Maritime University Annals*, Year XV, vol. 21, 49–54, 2014.
- [101] Martinas, G., Buzbuchi, N., Arsenie, A., **Lamba, M.D.**, The Influence of a Wake Equalizing Duct Over the Fluid Flow Around the After Body of a Port Container and Propeller Efficiency, *Constanta Maritime University Annals*, Year XV, vol. 21, 55–60, 2014.
- [102] Martinas, G., Arsenie, A., **Lamba, M.D.**, Numeric Geometry Optimization of an Wed for Duct Pressure Angle, Length and Radius, *Constanta Maritime University Annals*, Year XV, vol. 22, 55–60, 2014.
- [103] Martinas, G., Arsenie, A., **Lamba, M.D.**, Velocity Over the Target Surface and Pressure for a Numeric Geometry Optimization of an Wed, *Journal of Marine Technology and Environment*, Vol.1, 51–56, 2015.
- [104] Mikelis, N.E. and Journee, J.M.J., Experimental and numerical simulations of sloshing behaviour in liquid cargo tanks and its effect on ship motions. *National Conference on Numerical Methods for Transient and Coupled Problems*, Venice, Italy, 9-13, 1984.
- [105] Moan, T., Marine structures for the future. CORE Report No. 2003-01, Centre for Offshore Engineering & Research, National University of Singapore, 2003.
- [106] Mizine, I. et al., Interference phenomenon in design of trimaran ship, 10th Int. Conf. on Fast Sea Transportation (FAST), Athens <http://www.numeca.be/fileadmin/newsite/Papers/>, 2009.
- [107] Mikelis, N.E. and J.M.J. Journée, *Lloyd's Register of Shipping*, U.K., Delft University of Technology, Experimental and Numerical Simulations of Sloshing Behaviour in Liquid Cargo Tanks and its Effect on Ship Motion, *National Conference on Numerical Methods for Transient and Coupled Problems*, Venice, Italy, 9-13 July 1984.
- [108] Naeem, M.N. and Sharma, C.B. (2000). Prediction of natural frequencies for thin circular cylindrical shells. *Proceedings of the Institution of*

Mechanical Engineers. Part C, Journal of Mechanical Engineering Science, 214(10), 1313-1328.

[109] *Nguyen, T.D.*, Design of hybrid marine control systems for dynamic positioning. PhD Thesis, Department of Civil Engineering, National University of Singapore, Singapore, 2006.

[110] *Nukulchai, W.K. and Tam, B.T.*, Structure-fluid interaction model of tuned liquid dampers. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 46, 1541-1558, 1999.

[111] *Obreja D.* – „Teoria Navei”, Editura Didactică și Pedagogică, București, 2005.

[112] *P. Krata*, Gdynia Maritime University, Gdynia, Poland, The Impact of Sloshing Liquids on Ship Stability for Various Dimensions of Partly Filled Tanks, The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol.7, No.4, Dec.2013.

[113] *Park, J.J., Kim, M.S. and Ha, M.K.*, Three-dimensional sloshing analysis of LNG carriers in irregular waves. Proceedings of the Fifteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, Seoul, Korea, 3, 209-213, 2005.

[114] *Pricop M.* – „Calculul stabilității navei la unghiuri mari de înclinare”, Academia Navală „Mircea cel Bătrân”, Constanța, 2009.

[115] *R. Thundil Karuppa Raj, T. Bageerathan and G. Edison*, School of Mechanical and Building Sciences, VIT University, Vellore, Tamil Nadu, India, Design of fuel tank baffles to reduce kinetic energy produced by fuel sloshing and to enhance the product life cycle, ARPN Journal of Engineering and Applied Science, March 2014.

[116] *Raicu, A., Raicu, G., Lamba, M.D.*, Improved the Maritime Online Teaching by Using the Knowledge Management Concept, Constanta Maritime University Annals, Year XIV, vol. 19, 65–68, 2013.

[117] *Rammerstorfer, F.G., Scharf, K., Fischer, F.D. and Seeber, R.*, Collapse of earthquake excited tanks. Journal of Mechanical Research, 25, 129-143, 1988.

[118] *Rao, S.S.*, Mechanical Vibrations. Addison-Wesley Publishing Company, USA, 1990.

[119] *Reddy, J.N.*, A simple higher-order theory for laminated composite plates. Journal of Applied Mechanics, 51, 745-752, 1984.

[120] *Rognebakke, O.F. and Faltinsen, O.M.*, Coupling of sloshing and ship motions. Journal of Ship Research, 47(3), 208-221, 2003.

[121] *Shin, J.R., Choi, K. and Kang, S.Y.*, An analytical solution to sloshing natural periods for a prismatic liquid cargo tank with baffles. Proceedings of the Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, San Francisco, California, USA, 3, 236-242, 2006.

[122] *Shrimali, M.K. and Jangid, R.S.*, Seismic response of liquid storage tanks isolated by sliding bearings. Engineering Structures, 24, 909-921, 2002.

[123] *Sørensen, A.J.*, Short Course on Marine Control Systems. National University of Singapore, 3rd-5th May 2004.

- [124] Soorya, Elizabeth, G., Dr. Sheeja, Janardhanan, Estimation of Structural Strength of Tanks under Sloshing Loads. Department of Mechanical engineering, SCMS School of Engineering and Technology, Karukutty, Kerala, India. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 5(9), 16037-16050, 2016.
- [125] Subhash, B.S. and Bhattacharyya, S.K., Finite element analysis of fluidstructure interaction effect on liquid retaining structures due to sloshing. Computers & Structures, 59(6), 1165-1171, 1996.
- [126] Tedesco, J.W., Landis, D.W. and Kostem, C.N., Seismic analysis of cylindrical liquid storage tanks. Computer & Structures, 32(5), 1165-1174, 1989.
- [127] To, C.W.S. and Wang, B., An axisymmetric thin shell finite element for vibration analysis. Computers & Structures, 40(3), 555-568, 1991.
- [128] Vamsi, K.B. and Ganesan, N., Polynomial approach for calculating added mass for fluid-filled cylindrical shells. Journal of Sound and Vibration, 291, 1221-1228, 2006.
- [129] Van Dokkum K. – „Ship Knowledge, a modern encyclopedia”, Dokmar Publisher, Netherland, 2003.
- [130] Veletsos, A.S. and Tang, Y., Rocking response of liquid storage tanks. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 113(11), 1774-1792, 1987.
- [131] Visonneau, M.; Queutey, P., Model and full-scale free-surface viscous flows around fully-appended ships, ECCOMAS CFD 2006, Egmond aan Zee, 2006.
- [132] Warnitchai, P. and Pinkaew, T., Modelling of liquid sloshing in rectangular tanks with flow-dampening devices. Engineering Structures, 20(7), 593-600, 1998.
- [133] Watson, E.B.B. and Evans, D.V., Resonant frequencies of a fluid container with internal bodies. Journal of Engineering Mathematics, 25, 115-135, 1991.
- [134] Watts, P., On a method of reducing the rolling of ship at sea. Transactions of the Institute Naval Architecture, 1, 165, 1883.
- [135] Watts, P., The use of water chambers for reducing the rolling of ships at sea. Transactions of the Institute Naval Architecture, 2, 30, 1885.
- [136] Weng, C., Roll motion stabilization for small fishing vessels. Ph.D. thesis, Memorial University of Newfoundland, Canada, 1992.
- [137] Westergaard, H.M., Water pressure on dams during earthquakes. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 98, 418-433, 1933.
- [138] Xi, Z.C., Yam, L.H. and Leung, T.P., Free vibration of a laminated composite circular cylindrical shell partially filled with fluid. Computer Part B, 28B, 359-375, 1997.
- [139] Youssef, K.S., Ragab, S.A., Nayfeh, A.H. and Mook, D.T., Design of passive anti-roll tanks for roll stabilization in the nonlinear range. Ocean Engineering, 29, 177-192, 2002.
- [140] Yue, B., Wang, Z. and Li, J., Liquid sloshing in cylindrical tank with elastic spacer. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 1(2), 67-70, 1996.

[141] Zhang, A. and Suzuki, K., A comparative study of numerical simulations for fluid–structure interaction of liquid-filled tank during ship collision. Ocean Engineering, 34, 645-652, 2007.

[142] Zienkiewicz, O.C., The Finite Element Method in Engineering Science. McGraw-Hill, New York, 1971.

[143] ***Health and Safety Executive, UK – „Stability”, Offshore Technology Report, OTO 2001/049, London, 2001.

[144] ***IMO Publication – „International Conference on Load Lines, 1966”, Edition, London, 2005.

[145] ***IMO Publication – „IMSBC Code”, London, 2012.

[146] ***IMO Publication – „SOLAS Consolidated Edition”, London, 2010.

[147] ***IMO Publication – „Code of intact Stability for All Types of Ships”, London, 2008.

[148] ***International Association of Classification Societies – „Requirements concerning strength of ships – Longitudinal strength standard”, London, 2003.

[149] ***Lloyd’s Register – „Ship right structural design – Sloshing loads and scantlings assessment”, London, 2004.

[150] ***Oil Electric Magazine, 2011.

[151] ***Norwegian Standards NORSOK N003 – „Actions and action effects”, Norway, 1999.

[152] ***Norwegian Standards NORSOK N004 – „Design of steel structures”, Norway, 1999.

[153] ***RINA – „The naval architect – Montly journals”, Royal Institute of Naval Architects, 2005.

[154] ***www.marinetraffic.com.