

**IOSUD - UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI**

**Școala doctorală Inginerie Mecanică și Industrială**



**TEZĂ DE DOCTORAT**

**REZUMAT**

**CONTRIBUȚII PRIVIND INFLUENȚA  
GEOMETRIEI STRUCTURILOR  
NAVALE ASUPRA TENSIUNILOR  
DATORATE SOLICITĂRILOR DE  
IMPACT**

**Doctorand,  
Manuela NECHITA**

**Conducător științific,  
Prof. univ. dr. ing. Costel Iulian MOCANU**

**Seria I6 Inginerie mecanică Nr. 50**

**GALAȚI  
2020**



**IOSUD - UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI**

**Școala doctorală de Inginerie Mecanică și Industrială**



# **TEZĂ DE DOCTORAT**

## **REZUMAT**

**CONTRIBUȚII PRIVIND INFLUENȚA GEOMETRIEI STRUCTURILOR NAVALE ASUPRA  
TENSIUNILOR DATORATE SOLICITĂRILOR DE IMPACT**

**Doctorand,**

**Manuela NECHITA**

**Conducător științific,**

**Prof univ.dr.ing. Costel Iulian MOCANU**

**Referenți științifici**

**Prof univ.dr.ing. DHC Anton HADĂR**

**Prof univ.dr.ing. Ioan-Călin ROȘCA**

**Prof univ.dr.ing. Leonard DOMNIȘORU**

**Seria I6 Inginerie mecanică Nr. 50**

**GALAȚI**

**2020**



***Dacă vrei să construiești un vapor, să nu începi prin a-i trimite pe oameni după lemne, cuie, unelte, sfori și alte materiale. Învață-i întâi să tânjească după marea îndepărtată, nesfârșită.***

*Antoine de Saint Exupery*



NS Mircea în marș omagial (80 de ani), Galați 19 Septembrie 2019



## Introducere

Navigația fluvială deține în prezent o pondere însemnată în ansamblul transporturilor de marfuri, în Europa centrală aceasta fiind o treime din totalul traficului. În anul 2011, pe fluviul Dunărea inclus în Coridorul VII Pan-european, România a realizat 58.4 % din totalul transporturilor de mărfuri pe canale navigabile. Condițiile meteo nefavorabile, decizii greșite în timpul manevrelor de acostare sau de parcare în șenal, pot perturba aceste activități, prin avarierea structurii barjelor intrate în coliziune.

În funcție de marfa transportată, care poate fi pierdută în masa de apă, se poate ajunge la poluarea mediului înconjurător. Chiar dacă pe apele interioare există un coeficient de risc redus de producere a accidentelor navale, scufundarea unei nave poate bloca acvatoriul porturilor sau șenalului navigabil, cu mari efecte economice negative.

Fără cunoașterea răspunsului datorat tipurilor reale de solicitări întâlnite la utilizarea în condiții reale de exploatare, încercarea de îmbunătățire a unei structuri plutitoare, pentru transportul mărfurilor, poate conduce la cedarea prematură a acesteia.

În vederea proiectării unei structuri navale, cu o rezistență sporită la impact, în această lucrare sunt prezentate și analizate diverse comportări, la impact, ale unei structuri de barjă din punctul de vedere al îmbunătățirii acesteia, prin modificarea geometriei.

### **Scopul și obiectivele lucrării:**

Scopul principal al acestei lucrări este conceperea unei metodologii pentru verificarea și modificarea geometriei structurii unei barje (lucru valabil pentru orice categorie de plutitor), care să răspundă cerințelor de asigurare a siguranței în exploatare, în cazul solicitărilor accidentale ale acesteia. A fost aleasă, spre studiu, barja de 2000T, care este cea mai des folosită pentru transportul mărfurilor pe apele interioare, respectiv pe sistemul de canale Dunare-Rin.

### **Obiectivul general:**

Dezvoltarea unei metodologii integrate de apreciere și de concepere de soluții pentru micșorarea și/sau reducerea efectului impactului dintre plutitori pentru evaluarea influenței geometriei asupra tensiunilor și avariilor care apar în urma fenomenelor de impact mecanic al structurilor metalice navale.

### **Obiective specifice:**

1. Stadiul actual al cunoașterii în domeniul evaluării efectelor coliziunii dintre structuri marine (nave).
2. Dezvoltarea unei metodologii experimentale de determinare a deformațiilor elasto-plastice la impactul dintre corpuri.
3. Studiul comparativ, folosind Metoda Elementelor Finite, pentru diverse scenarii de impact, cu viteze diferite, al comportării elementelor componente ale bordajului unei barje impactată de un corp, în domeniul plastic.
4. Studiul comparativ pentru diverse tipuri de structuri obținute din cea inițială prin modificarea grosimilor elementelor constructive ale bordajului precum și prin modificarea curburii acestuia.
5. Stabilirea unor soluții de modificare adecvată a structurii barjei (navelor în general), pentru minimizarea efectelor coliziunii dintre structurile plutitoare.

6. Evaluarea soluțiilor de proiectare pentru diminuarea avariei unei structuri navale solicitată la impact.

Această lucrare cuprinde șase capitole, structurate astfel:

- Capitolul 1** Stadiul actual al cercetărilor privind impactul structurilor navale
- Capitolul 2** Metodologia de cercetare a fenomenului de impact asupra structurilor metalice
- Capitolul 3** Studiarea preliminară a unei structuri navale solicitată la impact
- Capitolul 4** Studiul influenței geometriei asupra tensiunilor unei structuri navale solicitată la impact
- Capitolul 5** Studiul influenței geometriei asupra ruperii unei structurii navale solicitate la impact
- Capitolul 6** Concluzii finale. Contribuții personale. Direcții viitoare de cercetare.

Tematica acestei teze este de mare actualitate, cercetările în acest domeniu fiind încă la început în România și de aceea se pot aborda și alte metode de rezolvare și încercări experimentale decât cele prezentate aici.



# CUPRINS

Pag. Pag.  
rezumat teză

	Mulțumiri.....	I	
	Cuvinte cheie.....	II	
	Introducere.....	I	III
Capitolul 1.	Stadiul actual al cercetărilor privind impactul structurilor navale .....	3	3
	1.1. Dinamica externă a structurilor navale supuse la impact.....	3	3
	1.2. Dinamica internă a structurilor navale supuse la impact.....	4	4
	1.2.1. Metode de analiză a daunelor structurale.....	4	4
	1.2.2. Fundamentele transformării energiei de impact în energie potențială de deformație.....	5	8
	1.3. Analiza experimentală a impactului structurilor navale.....	6	13
	1.3.1. Modele de laborator.....	7	15
	1.3.2. Experimente în natură.....	8	20
	1.4. Simularea numerică a impactului structurilor navale.....	8	21
	1.5. Concluzii .....	9	24
Capitolul 2.	Metodologia de cercetare a fenomenului de impact asupra structurilor metalice.....	11	27
	2.1. Metodologia de cercetare.....	11	27
	2.1.1. Standul de încercare și echipamentele utilizate pentru studiul experimental al impactului asupra unei plăci curbe.....	11	27
	2.1.2. Modelarea experimentală a impactului pe plăci curbe.....	12	28
	2.1.3. Modelarea numerică a impactului pe plăci curbe.....	13	30
	2.2. Interpretarea rezultatelor referitoare la influența geometriei asupra stării de tensiune și deformație.....	18	37
	2.3. Concluzii .....	19	38
Capitolul 3.	Studierea preliminară a unei structuri navale solicitată la impact .....	21	39
	3.1. Studiul preliminar al unei structuri navale pentru analiză structurală.....	21	39
	3.1.1. Modelarea geometriei unei structuri navale (modelare CAD). .....	21	39
	3.1.2. Modelarea structurală a geometriei unei structuri navale (Metoda Elementelor Finite).....	22	41
	3.2. Analiza structurală cu elemente finite a unei structuri navale solicitată la impact (Metoda Elementelor Finite).....	23	43
	3.3. Post-procesarea datelor.....	24	44
	3.4. Concluzii .....	25	50
Capitolul 4.	Studiul influenței geometriei asupra tensiunilor unei structuri navale solicitată la impact.....	27	51
	4.1. Studiarea unei structuri navale solicitată la impact lateral.....	27	51

	Pag. rezumat	Pag. teză
4.1.1. Alegerea procedurii pentru impactarea unei structuri navale.....	27	51
4.1.2. Analiza structurală a modelului supus la impact lateral.....	27	52
4.1.3. Interpretarea rezultatelor.....	29	56
4.2. Studiarea influenței geometriei asupra tensiunilor rezultate din impact.....	30	60
4.3. Modalități de diminuare a tensiunilor Von Mises rezultate în timpul impactului .....	32	63
4.3.1. Studiarea influenței frecării asupra impactului lateral al structuri navale cu geometrie reproiectată .....	32	64
4.3.2. Studiarea influenței geometriei asupra tensiunilor rezultate din impactul structurii navale reproiectată .....	33	66
4.4. Concluzii .....	34	67
<b>Capitolul 5. Studiul influenței geometriei asupra ruperii unei structurii navale solicitată la impact.....</b>	<b>35</b>	<b>69</b>
5.1. Scenarii ale impactului în bordul tribord al unei structurii navale ...	35	69
5.1.1. Evaluarea efectelor impactului pentru cazul energiei de impact de 100 kJ.....	36	71
5.1.2. Evaluarea efectelor impactului pentru cazul energiei de impact de 400 kJ .....	38	75
5.1.3. Analiza influenței geometriei structurii nemodificate asupra efectelor datorate impactului funcție de coeficienții de frecare dintre elementele structurii și impactor.....	39	80
5.1.4. Studiul apariției ruperii datorate solicitărilor de impact.....	41	84
5.2. Soluții de proiectare pentru diminuarea efectelor coliziunii.....	43	92
5.2.1. Reproiectarea caracteristicilor geometrice ale structurii (modificarea grosimii tablei învelișului și a elementelor de osatură..	44	92
5.2.2. Reproiectarea curburii osaturii.....	46	99
5.2.3. Evaluarea influenței curburii osaturii asupra efectelor datorate impactului.....	49	108
5.3. Concluzii.....	52	114
<b>Capitolul 6. Concluzii finale. Contribuții personale. Direcții viitoare de cercetare .....</b>	<b>55</b>	<b>117</b>
6.1. Concluzii finale .....	55	117
6.2. Contribuții personale.....	57	120
6.3. Direcții viitoare de cercetare.....	58	121
Lista lucrărilor publicate și prezentate.....		123
Bibliografie.....		61 125

**Conducător științific,**  
Prof. dr.ing. Costel Iulian Mocanu

**Comisia de îndrumare**  
Prof. dr.ing. Iulian Gabriel Bîrsan  
Prof. dr.ing. Leonard Domnișoru  
Conf. dr.ing. Gabriel Popescu

## CAPITOLUL 1

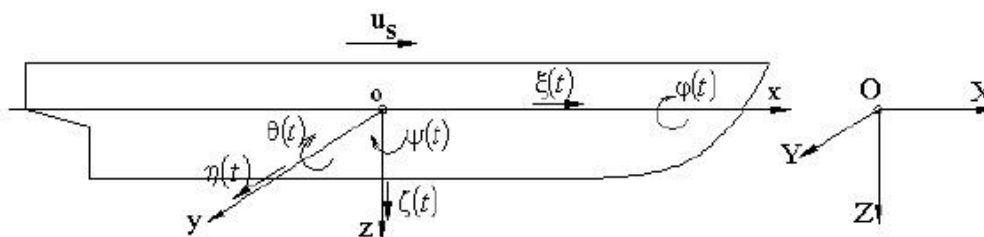
STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR  
PRIVIND IMPACTUL STRUCTURILOR NAVALE**Obiective**

Se vor evidenția principalele direcții de cercetare ale fenomenului de impact în domeniul naval. Se urmărește:

1. studierea dinamicii externe- interne a structurilor navale supuse la impact;
2. studierea analizei experimentale a structurilor navale supuse la impact;
3. studierea simulării numerice a structurilor navale supuse la impact.

**1.1. Dinamica externă a structurilor navale supuse la impact**

Nava este considerată corp rigid cu 6 grade de libertate (Fig.1.1, Tabel 1.1):



**Fig.1.1** Gradele de libertate la oscilația navei corp rigid, sisteme de coordonate [1]

**Tabel 1.1** Gradele de libertate ale navei

deplasări	rotiri
axială $\xi(t)$ 1	ruliu $\varphi(t)$ 4
derivă $\eta(t)$ 2	tangaj $\theta(t)$ 5
verticală $\zeta(t)$ 3	girație $\psi(t)$ 6

Determinarea impulsurilor datorate impactului și energiei de coliziune disipată în avarierea navei se realizează printr-o procedură analitică, iar analiza este restricționată la mișcarea navei în planul de la suprafața apei.

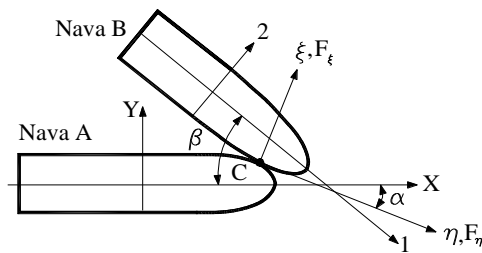
În 1982, Petersen [2] a prezentat o procedură în care era simulată în timp dinamica externă a coliziunilor navale. Hidrodinamica forțelor ce acționează asupra corpului navei în timpul coliziunii au fost calculate cu ajutorul teoriei deformațiilor. Navele implicate au fost considerate drept corpuri rigide cu deformații numai în zona de contact. Răspunsurile structurilor în zona de contact au fost modelate ca îndoiri elastice non-liniare. De asemenea Woisin [3] a realizat o analiză externă a unei coliziuni navă-navă și a estimat pierderile de energie cinetică. În acest caz coliziunea s-a considerat a fi plastică în totalitate. O procedură de analiză similară a fost dezvoltată de Pawlowski [4] și Hanhirova [5]. Și în aceste lucrări navele s-au considerat a fi complet rugoase, fără a permite vreo alunecare în zona de contact.

Zhang [6] a dezvoltat o metodă analitică ce descrie pierderea de energie și impulsul de impact pentru o coliziune arbitrară navă-navă. La începutul calculului a considerat că nava are deplasări pe direcția axei X și deplasări pe direcția axei Y, și ulterior se analizează alunecările și ricoșările, în planul suprafeței apei, din timpul coliziunii. Energia pierdută prin disiparea în deformațiile structurale ale structurilor implicate este exprimată prin expresii închise. Procedura

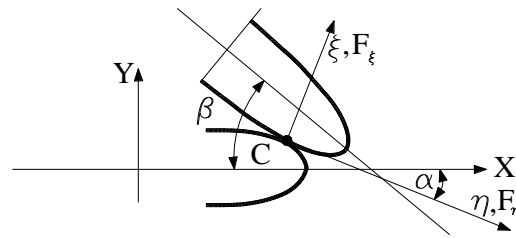
are la bază mecanica corpului rigid, unde se acceptă neglijabilă energia de deformație datorată solicitărilor exterioare regiunii de contact. Deoarece regiunea de contact se consideră mică și locală aceasta permite ca Zhang [6] să presupună instantanee coliziunea ca și cum fiecare corp exercită o forță impulsivă asupra celuilalt în punctul de contact. Modelul include frecarea dintre suprafețele de impact astfel încât sunt identificate situații cu ciocniri oblice.

Exemple numerice ale coliziunii navă-navă în diferite puncte și unghiuri de impact sunt comparabile cu rezultatele obținute prin simulări în domeniul timp. Aceasta arată că procedura ce are la bază mecanica corpului rigid este suficient de precisă pentru analiza coliziunii navă-navă [6].

Zhang consideră pentru studierea coliziunilor, că nava care lovește (nava A) înaintează cu vitezele  $v_{ax}$  și  $v_{ay}$  și impactează nava (nava B), care se deplasează cu vitezele  $v_{b1}$ ,  $v_{b2}$ .



**Fig.1.2** Sistemul de coordonate utilizat la coliziunea navelor [6]



**Fig.1.3** Sistemul de coordonate  $\xi \eta$  utilizat la coliziunea navelor (detaliu)

Sistemul de coordonate - XYZ îl consideră fixat pe fundul mării. Axa Z este aleasă pe direcția de ieșire din apă, axa X rămâne în planul de simetrie al navei care lovește orientată către prova și originea sistemului XYZ este orientată astfel încât secțiunea din mijlocul navei este în planul YZ la momentul  $t=0$ , ca în Fig.1.2. Fig.1.3 prezintă un detaliu în care originea sistemului este localizată în punctul C de impact, axa  $\xi$  este normală la suprafața de impact, unghiul dintre axa X și  $\eta$  este  $\alpha$ , iar unghiul dintre axa X și axa 1 este  $\beta$ .

## 1.2. Dinamica internă a structurilor navale supuse la impact

### 1.2.1. Metode de analiză a daunelor structurale

Dinamica internă studiază modalitatea în care energia de deformație este disipată în obiectele lovite și cele care lovesc și implică evaluarea rezistenței structurale în timpul deformațiilor mari, prin folosirea teoriei plasticității sau a metodei elementului finit. Astfel se analizează răspunsul structural din timpul coliziunii și se stabilesc metode simplificate de calcul pentru realizarea curbei forță- penetrație, relația dintre energia absorbită și penetrație și avaria rezultată în structurile navelor. Nava este considerată ca un ansamblu de structuri formate din plăci. Observațiile pe modelele și pe experimentele existente arată că mecanismul primar de absorbire a energiei de către structurile bordajului sunt:

- deformarea tablelor bordajului și a elementelor de rigidizare atașate
- îndoirea și strivirea cadrelor transversale și a stringherilor longitudinali
- îndoirea, tăierea și strivirea punților orizontale
- tăierea și strivirea fundului navei
- strivirea pereților despărțitori

Metodele existente de analiză a daunelor structurilor datorate coliziunilor se împart în patru categorii:

1. Metode empirice

2. Metoda elementului finit
3. Metode experimentale
4. Metode simplificate

În acest paragraf sunt prezentate doar prima și ultima metodă, în paragrafele următoare fiind descrise celelalte două categorii.

Cea mai cunoscută metodă empirică a fost introdusă de Minorsky [7] care a analizat 26 cazuri de coliziune și a dezvoltat o formula pentru determinarea materialului distrus în timpul coliziunilor navelor.

Formula empirică propusă de Minorsky [7] indică că energia absorbită de o navă în timpul coliziunii este direct proporțională cu volumul materialului distrus. De aceea dacă se proiectează o navă pentru a rezista la coliziuni, aceasta se supradimensionează. Nu este în întregime adevărat, atâta timp cât eficiența de absorbție a energiei este diferită de la o structură la alta. Ea depinde de aranjamentul structurii, de proprietățile de material și de modul de distrugere.

Astfel Zhang [6] a stabilit o relație între energia absorbită și volumul distrus, ce consideră aranjarea structurilor, proprietățile de material și dimensiunea avariei. Metoda a fost validată prin experimente și prin simulări numerice. Metoda este o alternativă la metoda Minorsky. Formulele propuse iau în considerare următoarele trei mecanisme de absorbire a energiei identificate:

1. energia absorbită prin modul de distrugere prin deformare plastică;
2. energie absorbită prin modul de distrugere prin strivire și îndoire;
3. energie absorbită prin modul de distrugere prin ruperea de-a lungul navei.

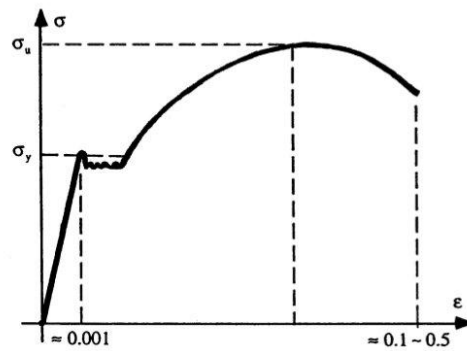
Reckling [10] a propus o metodă care a luat în considerare deformarea atât a navei care lovește cât și a navei lovite. Energia absorbită în ambele nave, până la rupere corpului navei lovite, a fost calculată prin metode simple. A fost realizat un exemplu de calcul pentru două petroliere egale de 141.000 tdw. Rezultatele au arătat că energia absorbită prin tensionarea membranelor bordajului este doar 18% din energia totală, în timp ce energia absorbită în cadrele transversale, punți și fundul navei lovite este de 40% din energia totală. Structura provei navei care a generat coliziunea a absorbit 42% din energia totală. Pedersen et al. [11] a studiat încărcările ce au dus la strivirea provelor navelor. În analiză, au fost aplicate formulele propuse de Gerard [12], Amdahl [13], și Yang și Caldwell [14]. Similar, Pedersen [15] a obținut o expresie empirică pentru un impact cu încărcare laterală, care poate fi folosită la coliziunea cu stâlpii podurilor.

### 1.2.2. Fundamentele transformării energiei de impact în energie potențială de deformare

Se folosește o metoda simplificată (sau analiza limitelor), larg răspândită în analiza și proiectarea inginerescă. S-a demonstrat că metoda este valabilă pentru estimarea încărcării limită a unei structuri supuse la încărcări extreme. Încărcarea limită astfel obținută poate fi folosită ca o bază reală de proiectare. Metoda analizei limită este o metodă aproximativă.

În metoda analizei limitei, un punct cheie îl reprezintă construcția vitezei cinematice admisibile și a câmpului deplasărilor. Acesta se bazează pe observațiile obținute în timpul testelor experimentale, accidentelor sau studiilor de analiză existente.

Este foarte cunoscut că tensiunea de curgere pentru oțelul moale este foarte sensibilă la viteza de variație a deformației specifice. Jones [22] a arătat experimental că tensiunea de curgere pentru un oțel moale crește cu creșterea vitezei de variație a deformației specifice.



**Fig.1.6** Curba de variație tipică tensiune-deformație specifică

Dacă o structură este deformată suficient, ea se va rupe și va determina avaria. Precizarea ruperii unei structuri reprezintă o problemă foarte complicată. Diferite încărcări determină moduri de avarie diferite. Jones s.a. [23] a abordat criteriile de rupere ale barelor metalice ductile supuse la solicitări dinamice mari. Așa cum a menționat Simonsen [21], metodele simplificate sunt bazate pe mecanismele generale de deformare. Valoarea maximă a deformației specifice a fost folosită, drept criteriu de cedare structural, în multe cercetări ale unor autori consacrați precum Wang [24] și Paik și Pedersen [20]. Conform acestui criteriu când deformația specifică maximă într-o structură atinge deformația specifică critică, structura se rupe.

În calculele practice, trebuie cunoscută deformația specifică critică a materialului pentru predicția avariei structurale.

În general, aceasta rezultă din experimentele întindere axială. O curbă tipică tensiune - deformație specifică pentru un oțel moale este prezentată în Fig. 1.6.

Experimentele realizate de Wen și Jones [25] și Amdahl [26] au arătat că ductilitatea de întindere a unui oțel moale este cuprinsă între 0.20 și 0.35. Amdahl [27] a subliniat că datorită efectului de scară și a imperfecțiunilor de material, această valoare este prea mare pentru evaluarea coliziunilor navale. Deformația specifică critică sugerată de Amdahl [27] pentru coliziunile laterale este cuprinsă între valorile 5% și 10%. În coliziunile minore analizate de McDermott s.a. [28], deformația specifică de rupere pentru materialele din oțel moale în cazul coliziunilor laterale a fost evaluată la:

$$\varepsilon_c = 0.10 \left( \frac{\varepsilon_f}{0.32} \right) \quad (1.15)$$

unde  $\varepsilon_f$  este ductilitatea de întindere. McDermott s.a. a indicat că această formulă a fost validată experimental, pentru deformarea învelișului.

Când deformația specifică critică de rupere este cunoscută, deplasarea critică sau penetrația învelișului poate fi determinată.

### 1.3. Analiza experimentală a impactului structurilor navale

Experimente referitoare la coliziunea navelor au fost demarate la începutul deceniului șase al secolului XX. Din 1962 până în 1976 cercetătorii din Italia, Germania și Japonia au realizat o serie de teste pe modele. O parte dintre autori au prezentat rezultatele detaliate ale acestor experimente, ca exemplu, Amdahl [13], Jones [29], Ellina și Valsgard [30]. Samuelides

[31], și Pedersen s.a. [11]. Principalul scop al experimentelor făcute în Italia, Germania și Japonia, a fost proiectarea navelor pentru protecția reactorului nuclear în cazul coliziunilor.

În Italia, 24 de experimente pe modele au fost executate pentru a examina eficiența structurilor diferitelor tipuri de bordaje la impactul cu variate tipuri de nave.

Între anii 1967 și 1976 au fost testate 12 modele de nave în Germania [8]. Modelele au fost realizate la scări cuprinse între 1 / 12 și 1 / 7.5. Modul de desfășurare a testului este arătat în Fig. 1.8, ce ilustrează mișcarea probei navei ce lovește de-a lungul unei căi ferate înclinată. Prova navei înregistrează daune mari ca urmare a coliziunii, în timp ce bordul navei lovite a fost proiectată cu o structură specială de protecție.

Aceste experimente sunt dificil de realizat deoarece necesită condiții deosebite, atât financiare cât și din punct de vedere al securității vieții. În Fig.1.10, este prezentat un astfel de experiment.



**Fig.1.8.** Experimente efectuate pentru coliziunea navelor în Germania [8]



**Fig.1.10.** Distrugerea unei probe după un test de coliziune în Germania [6]

În prezenta lucrare, este realizată o documentare referitoare la experimentele în domeniul plastic, realizate pe modele atât în laborator cât și în natură.

### 1.3.1. Modele de laborator

Între anii 1966 și 1970 o serie de teste pe modele, referitoare la coliziuni, au fost efectuate în Japonia. Au fost realizate atât experimente statice cât și dinamice și au acoperit diferite aspecte ale problemelor specifice coliziunilor cum ar fi, proiectarea structurii bordurilor, efectul formei probei navei ce lovește și efectul masei adăugate. Detalii ale experimentelor au fost oferite de Akita s.a.[31]. Amdahl și Kavlie [26] au realizat teste pe modele prin care s-a simulat corpul navei lovit de un corp rigid hexagonal. Acest test original a simulat o eșuare, dar este foarte folositor și în analiza coliziunilor laterale.



**Fig.1.13.** Un model de bord la scara 1:1 după experimentarea unei coliziuni în Danemarca [34]

Experimente la scara 1:1 au fost realizate de Qvist s.a. [34], unul fiind ilustrat în Fig.1.13.

În Japonia au fost realizate câteva teste pentru distrugerea frontală a navelor, ca exemplu, Hagiwara s.a. [35] care a folosit un model la scara 1/5 pentru un cargou de 17.000 tdw cu cadre transversale. Wierzbicki [16] și Abramowicz și Jones [36] au investigat strivirea axială a elementelor structurale de bază [37] iar Simonsen și Ocakli [34] de la Universitatea Tehnică din Danemarca au realizat o serie de teste pe modele de pereti interiori.

### 1.3.2. Experimente în natură

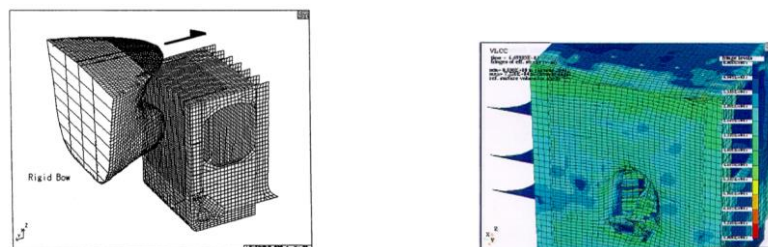
Timp de 7 ani (1991-1997) s-a desfășurat în Japonia un proiect ce a avut ca scop stabilirea unei metodologii de predicție a comportamentului structurii unui tanc petrolier supuse impactului. Acest proiect s-a concentrat asupra a două aspecte. Unul a fost dinamica procesului de avariere a structurilor datorate coliziunii sau eșuărilor, și celălalt s-a referit la procesul de împrăștiere a petrolului și/ sau accesul apei prin corpul navei distruse. O serie de experimente au fost realizate în Olanda de Japonia împreună cu Olanda (1991). Au fost folosite două petroliere de 80 m. lungime, pe un canal navigabil în interiorul țării. După experimentul din 1991, noi experimente au fost realizate de Japonia împreună cu Olanda și Germania în noiembrie 1997. Un petrolier de 1500 t. s-a ciocnit cu un alt petrolier de 1500 t. Prova care lovea avea bulb. Zona de testare a fost aleasă la mijlocul navei lovite [6]. Experimentul din anul 1998 este prezentat în Fig.1.23.



**Fig.1.23.** Experiment de coliziune realizat în Olanda în anul 1998 [6]

### 1.4. Simularea numerică a impactului structurilor navale

Metoda elementului finit (MEF) este o aplicație puternică de analiză a răspunsului structural în studiul coliziunilor. Există mai multe variante disponibile cum ar fi LS-DYNA3D, ABAQUS, MSC/DYTRAN. Mulți cercetători au folosit MEF pentru analiza coliziunilor, cum ar fi Kitamura [39], Sano și Muragish [40] și Kuroiwa [41]. Un exemplu tipic de analiză MEF pentru o coliziune realizată de Kitamura [39] este prezentată în Fig.1.24.



**Fig.1.24.** Simularea coliziunii navă-navă cu folosirea MEF [39]



În analiza structurală Cook R.D. s.a. [42] se consideră că nonliniaritatea poate viza cel puțin (uneori toate) o perturbare geometrică, de material sau/și schimbarea frontierei.

În rezolvarea problemelor neliniare se folosesc atât metode pentru determinarea soluțiilor statice cât și dinamice. S.A.Myhre [43] și Cook R.D. s.a. [42] consideră ca metoda soluției statice se utilizează pentru aflarea răspunsului pe termen lung, pentru o structură supusă unor solicitări ce variază puțin în timp, Totuși S.A.Myhre [43] recomandă metoda soluției dinamice pentru rezolvările în care solicitările sunt dinamice sau durata aplicării acestora este mică. Astfel, impactul unei nave cu un obstacol sau cu o altă navă se studiază cu această ultimă metodă deoarece interacția este scurtă.

În analiza cu element finit, costul de timp este un factor dominant. Mărimea incrementului de timp este limitată de cel mai mic element finit. Pentru a completa condițiile de stabilitate incrementul de timp trebuie să fie mai mic decât timpul necesar solicitării de impact pentru a trece de element. Dacă incrementul de timp este prea mare, solicitarea trece necontrolată și determină o structură instabilă.

Pentru elementele tip shell mărimea critică a incrementului de timp este dată de formula:

$$\Delta t_c = \frac{L_s}{c} \quad (1.18)$$

unde  $L_s$  este lungimea caracteristică a unui element iar  $c$  este viteza sunetului în material dată de formula:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho(1 - \nu^2)}} \quad (1.19)$$

unde  $E$  este modulul lui Young,  $\rho$  este densitatea specifică a materialului și  $\nu$  este coeficientul lui Poisson.

## 1.5. Concluzii

În urma documentării realizate s-a observat că în literatura de specialitate studiată au fost determinate atât energiile cinetice și potențiale declanșate în timpul coliziunii, analitic sau experimental, cât și energiile disipate în structură. Deoarece în domeniul cercetării fenomenului de impact naval experimentele sunt foarte costisitoare, rezultatele obținute reprezintă încă referințe pentru analize numerice realizate în ultimii ani [46]. În aceste lucrări nu a fost luată în considerare influența geometriei structurilor navale lovite, asupra solicitărilor ce apar în corpul unei nave datorită solicitărilor de impact.

Astfel am ales ca temă de studiu, pentru această teză, studiarea influenței geometriei structurilor navale asupra tensiunilor datorate solicitării de impact.

Am considerat că procedura propusă de Zhang [6] este suficient de precisă pentru analiza coliziunii. Ciocnirea este simetrică realizată la nivelul apei, cu considerarea forțelor de frecare și cu neglijarea forțelor de inerție și a energiei elastice apărută la impact [49].

Pentru rezolvarea temei și evaluarea tensiunilor datorate impactului structurii au fost propuse următoarele două obiective principale:

1. diminuarea tensiunilor din structură navală;
2. diminuarea dimensiunilor zonei avariate în urma impactului.

Pentru atingerea acestor obiective generale, prin derivare, au fost obținute următoarele obiective specifice:

- determinarea deplasărilor de răspuns la impact prin teste experimentale pentru simularea la impact a plăcilor metalice curbe;
- elaborarea unei metodologii de analiză a fenomenului de impact al plăcilor curbe;
- realizarea unor analize numerice pentru identificarea parametrilor ce influențează fenomenul de impact;
- analiza influenței geometriei structurilor navale asupra tensiunilor datorate solicitării de impact;
- evaluarea soluțiilor de proiectare pentru diminuarea avariei unei structuri navale solicitată la impact.

## CAPITOLUL 2

### METODOLOGIA DE CERCETARE A FENOMENULUI DE IMPACT ASUPRA STRUCTURILOR METALICE

**Obiectivele acestui capitol sunt următoarele:**

1. determinarea experimentală a solicitărilor care acționează asupra structurii metalice la impactul asupra unei plăci curbe;
2. conceperea unei metodologii de verificare numerică, prin reconstrucția experimentului realizat asupra unei plăci curbe;
3. analiza solicitărilor de impact asupra plăcilor curbe.

Acest capitol are drept scop elucidarea fenomenului de impact asupra unor plăci curbe pentru a mări energiile interne la impact. Concluziile formulate, după compararea analizelor experimentale și simulărilor numerice, permit alegerea unei geometrii adecvate la impact.

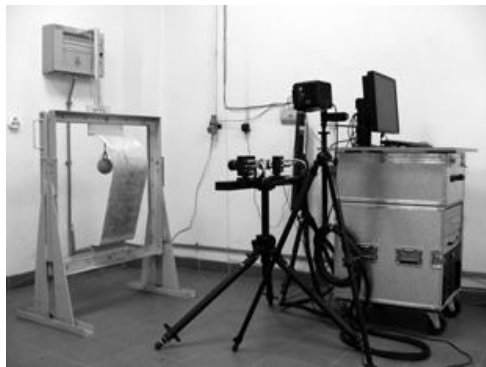
#### 2.1. Metodologia de cercetare

Pentru atingerea obiectivelor propuse pentru această cercetare au fost efectuate analize experimentale pe stand și pe aparatură oferită de Universitatea Dunărea de Jos din Galați (UDJG), modelele experimentale fiind oferite de șantierul naval DAMEN S.A Galați. Modelul experimental de analiză a folosit apoi ca bază de plecare în cercetările numerice ale fenomenului de impact asupra structurilor metalice.

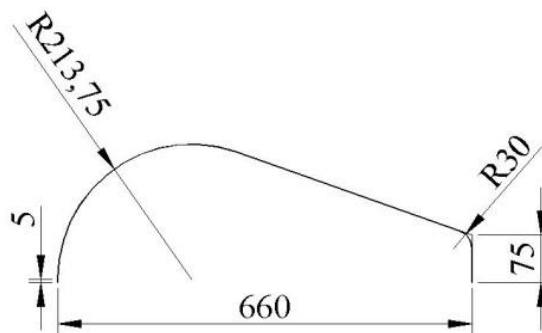
##### 2.1.1 Standul de încercare și echipamentele utilizate pentru studiul experimental al impactului asupra unei plăci curbe

Experimentele au fost realizate în vederea înțelegerii și apoi a validării modelărilor numerice la impactul structurilor metalice.

Standul experimental utilizat este format din: model placa curbă din oțel montată rigid pe suport rigid confecționat din oțel, masa metalică (sferă) cunoscută pentru realizarea impactului și pentru determinarea stării de deformație, echipamentul Aramis HS GOM, prezentate în Fig. 2.1. La determinarea deformațiilor datorate impactului s-au folosit datele experimentale furnizate de echipamentul optic GOM Aramis High Speed (HS), obținute după calibrarea acestuia cu o precizie de măsurare de 0.04 pixeli [50].



**Fig.2.1.** Echipamentul Aramis HS GOM

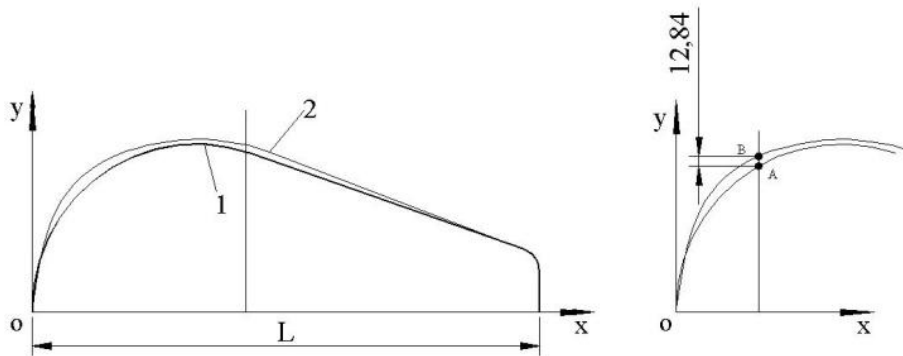


**Fig.2.2.** Secțiunea transversală prin modelul 1

Cele două plăci model au fost confecționate din oțel naval, primul model ( $m_1 = 8.3003 \text{ kg.}$ ) având forma constructivă prezentată în Fig.2.2, cu aria  $A_1=352455 \text{ mm}^2$ .

Pentru obținerea formei curbe specifice modelului 2 s-a realizat deplasarea punctului A (106.875, 185.11) în punctul B (106.875, 197.95). Curba 2 este menționată în Fig.2.3 și are aria  $A_2=356892 \text{ mm}^2$  și masa,  $m_2=8.4048 \text{ kg.}$

Ambele modele au aceeași grosime  $g = 3 \text{ mm}$  și aceeași dimensiune  $d = 300 \text{ mm}$ , pe direcția axei Z, identificabilă în Fig.2.3 și Fig.2.4. În incinta laboratorului de rezistența materialelor din cadrul universității s-a studiat comportamentul celor două plăci model impactate cu masa de oțel în greutate de 5, 37 kg. Sistemul experimental furnizează rezultatele sub forma unei baze de date.



**Fig.2.3.** Secțiunea transversală prin modelul 2

### 2.1.2. Modelarea experimentală a impactului pe plăci curbe

Corpul navei, din punct de vedere constructiv, este un sistem tehnic complex, elastic, supus acțiunii unor sarcini statice și dinamice. Învelișul exterior al corpului navei este format din file de tablă drepte și curbe de diferite dimensiuni, rigidizat la interior prin intermediul osaturilor simple și întărite. Învelișul asigură atât etanșeitatea corpului navei cât și rezistența corpului navei, împreună cu osatura, la solicitările statice și dinamice. Astfel în proiectarea navală rezistența la deformații a învelișului este un domeniu de cercetare de real interes pentru arhitecții navali. Experimentul realizat studiază comportarea a două plăci metalice având curburi diferite ce sunt solicitate la impact.

Au fost realizate două experimente pentru fiecare model. Forța de contact de 1950 N, a fost determinată cu un acceleratorm la momentul ciocnirii obiectului impactor cu modelele. Pentru a controla energia de impact a fost păstrată aceeași înălțimea de lansare a bilei pentru toate cele patru experimente. S-a considerat inflexibil firul cu lungimea  $L=300\text{mm}$ . cu care a fost legat obiectul impactor.

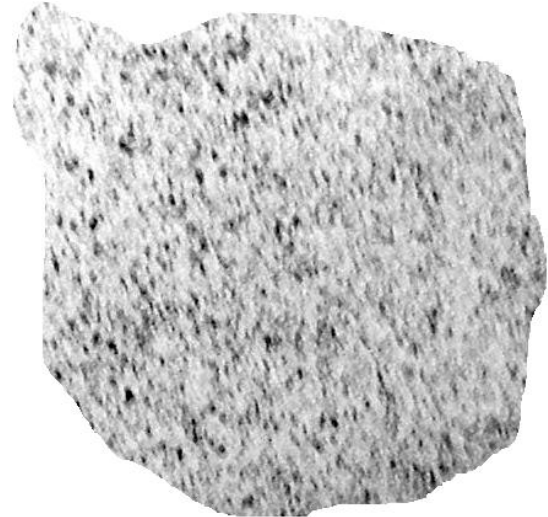
Pentru realizarea măsurătorilor cu sistemul Aramis HS a fost necesar ca pe suprafața fiecărui model să se realizeze o rețea de puncte. În Fig.2.4 și Fig.2.5 este prezentat modelul de vopsire a suprafeței acestuia cu vopsea albă și stropirea cu vopsea neagră (ambele tipuri de vopsea fiind mate).

Obținerea acestei rețele permite măsurarea deplasărilor în timp, prin măsurarea mișcării acestor puncte negre în diferite intervale de timp. A fost filmată zona curbă, cea în care s-a produs impactul. Tabelar sunt prezentate deplasările punctului cu deformații maxime, pe durata de 11 ms a impactului, experimentul durând 1.6 secunde, urmărit în 800 de stagii. Acesta este maximum de stagii suportate de sistemul Aramis HS.

La acest experiment au fost alese aleator 17 puncte de analiză din baza de date oferita de sistemul Aramis HS.



**Fig. 2.4.** Pregătirea modelului pentru experiment



**Fig. 2.5.** Rețea de puncte negre pe suprafața modelului vopsit în alb

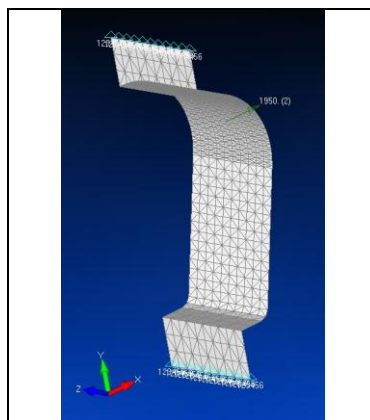
Rezultatele experimentale sunt prezentate în Tabel 2.2.

**Tabel 2.2.** Deplasarea maximă a punctelor studiate pentru celor două modele solicitate la impact

Model	Deplasare maximă (mm)	Punctul studiat
1	5.01	7
2	4.22	7

### 2.1.3. Modelarea numerică a impactului pe plăci curbe

Simularea numerică, realizată cu elemente finite în aplicația FEMAP 11.4, a permis modelarea ne-lineară a plăcilor, ca în Fig.2.7. S-a ales modelarea ne-lineară a materialului plăcilor pentru a studia comportamentul în domeniul elasto-plastic.



**Fig.2.7.** Modelarea cu element finit a plăcii model 1 și a obiectului impactor

Au fost realizate atât modelări ne-lineare statice cât și dinamice, pentru a studia variația deformațiilor și a tensiunilor precum și a energiei de deformație datorate solicitării la impact.

În aceste simulări obiectul impactor s-a considerat rigid iar pentru placă s-a ales un comportament definit în FEMAP prin material elasto-plastic biliniar, cu opțiune de întărire isotropică. Componentele forței impactoare,  $F=1950$  N, se consideră distribuite doar pe direcția axelor X și Y, pe direcția Z componenta acesteia fiind nulă. Unghiul forței impactoare față de axa X are valoarea  $\alpha_1 = 27^\circ$  pentru model 1, respectiv  $\alpha_2 = 28^\circ$  pentru modelul 2.

**Tabel 2.3.** Date simulare placă model- obiect impactor

Nr.crt	Tip modelare	Discretizare		Condiții de frontieră
		Model 1	Model 2	
Placa model	statică și dinamică	1960 elemente shell	1960 elemente shell	Încastrată pe 2 laturi ca în Fig. 2.1
Obiect impactor	dinamică	1573 elemente shell	1660 elemente shell	-

Solverul ADINA a fost utilizat pentru rezolvarea problemei dinamice de impact iar baza de date obținută a fost interpretată în aceeași aplicație. Datele de proiectare referitoare la caracteristicile celor două materiale folosite pentru simulare sunt incluse în Tabel 2.3 și Tabel 2.4.

**Tabel 2.4.** Proprietățile de material pentru oțel S235

Obiect	Modul longitudinal E (Pa)	Coeficientul Poisson	Densitatea (Kg/m <sup>3</sup> )	Modul Tangent (Pa)	Tensiunea de curgere (Pa)
Obiect impactor	2.1E11	0.30	7850	-	-
Placa model	2.1E11	0.30	7850	0.1E06	235E06

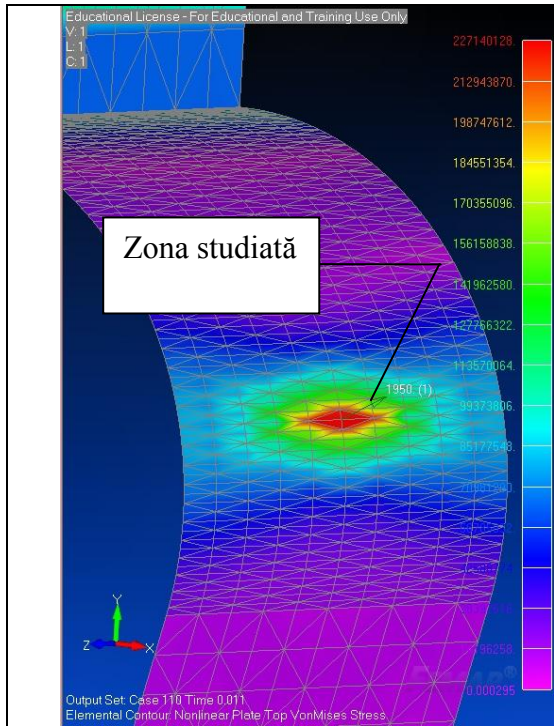
Modelarea statică s-a folosit pentru verificarea modelării numerice a materialului și a utilizat, pentru integrare, metoda full Newton Raphson, ca opțiune a aplicației Nastran-Femap. Ulterior, cu materialul ales, se realizează modelarea dinamică la impact.

Zona de interes analizată este cea unde a avut loc impactul cu masa impactoare și este ilustrată în Fig.2.8.

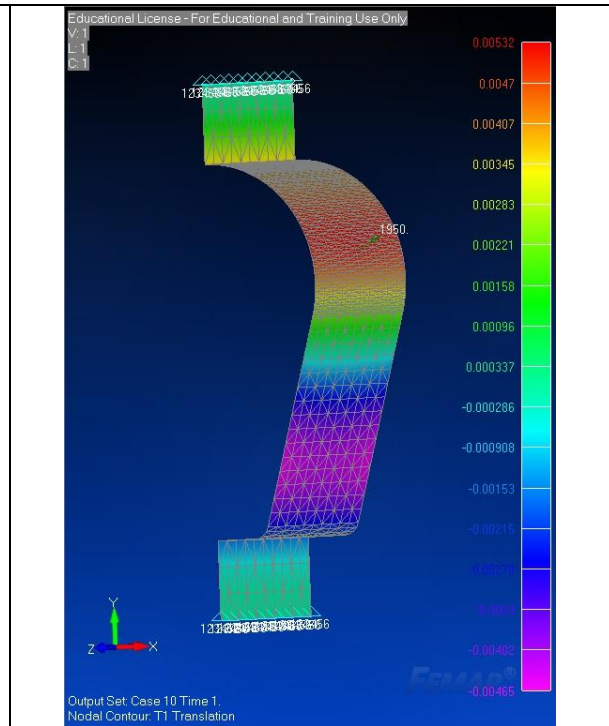
Valorile maxime ale deformațiilor în noduri, respectiv tensiunile Von Mises pe elementele celor două modele în cazul modelării statice sunt prezentate în diagramele din Fig.2.9, Fig.2.10, Fig.2.11 și Fig.2.12. Pentru nodurile de contact se consideră coordonatele, exprimate în metri: nod 523 - model 1 ( $x=0.212$ ,  $y=0.301$ ,  $z=0.15$ ) și nod 497- model 2 ( $x=0.217$ ,  $y=0.301$ ,  $z=0.150$ ).

Pentru modelarea dinamică, forța de impact a fost definită cu ajutorul unei funcții de timp , pe o durată de 11 milisecunde, similară fenomenului de impact din analiza experimentală. Deoarece durata este scurtă, pentru găsirea soluției se folosește metoda de integrare directă explicită, realizată cu opțiunea Advance Nonliniar Explicit. În diagramele din Fig.2.14, Fig.2.15, Fig.2.16 și Fig.2.17 sunt prezentate rezultatele analizei, valorile maxime fiind similare, ca tip, cu cele menționate la modelarea statică.

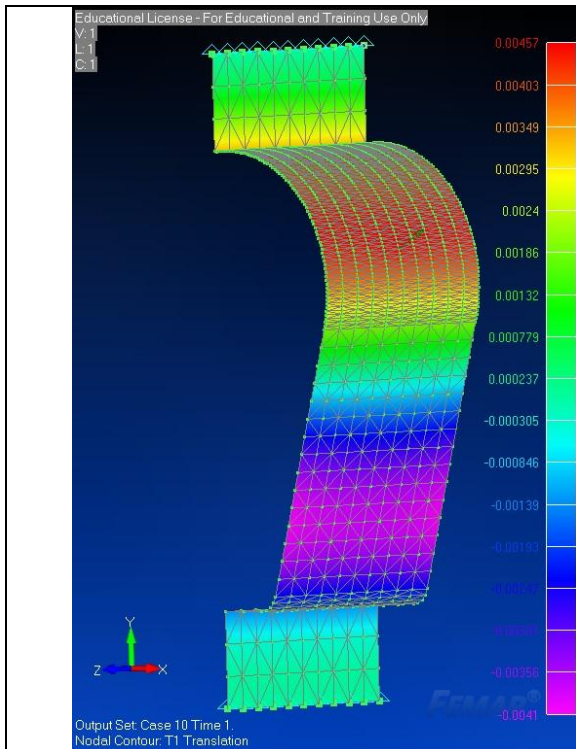
a) Modelarea statică a impactului în aplicația FEMAP 11.4



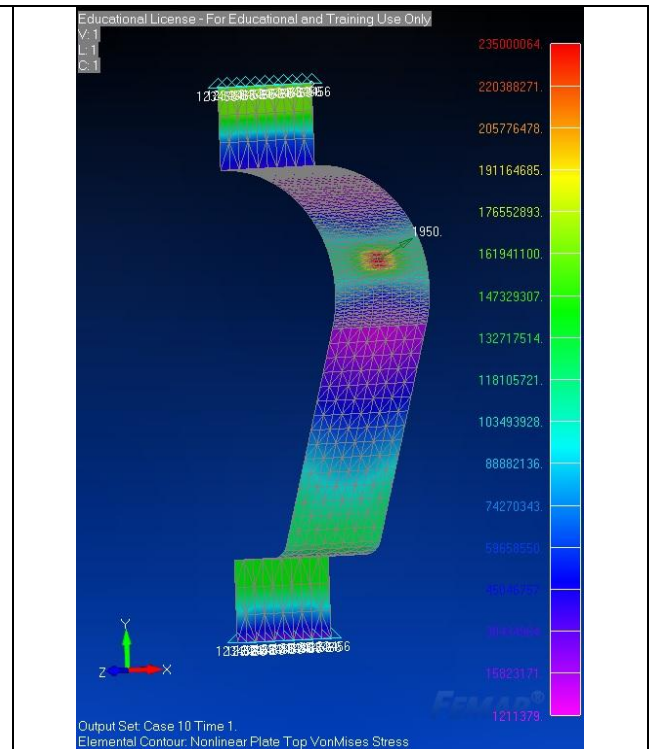
**Fig.2.8.** Detaliu zona impactată (valabila pentru ambele modele simulate)



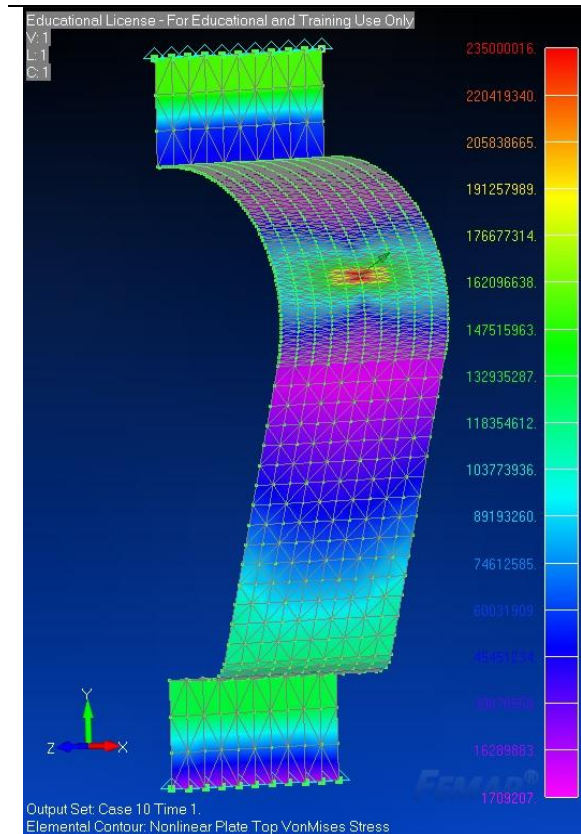
**Fig.2.9.** Distribuția deplasărilor punctelor pe axa X, în placa model 1 cu valoarea maximă în nodul 523, modelare ne-lineară statică



**Fig.2.10.** Distribuția deplasărilor punctelor pe axa X, în placa model 2 cu valoarea maximă în nodul 497, modelare ne-lineară statică

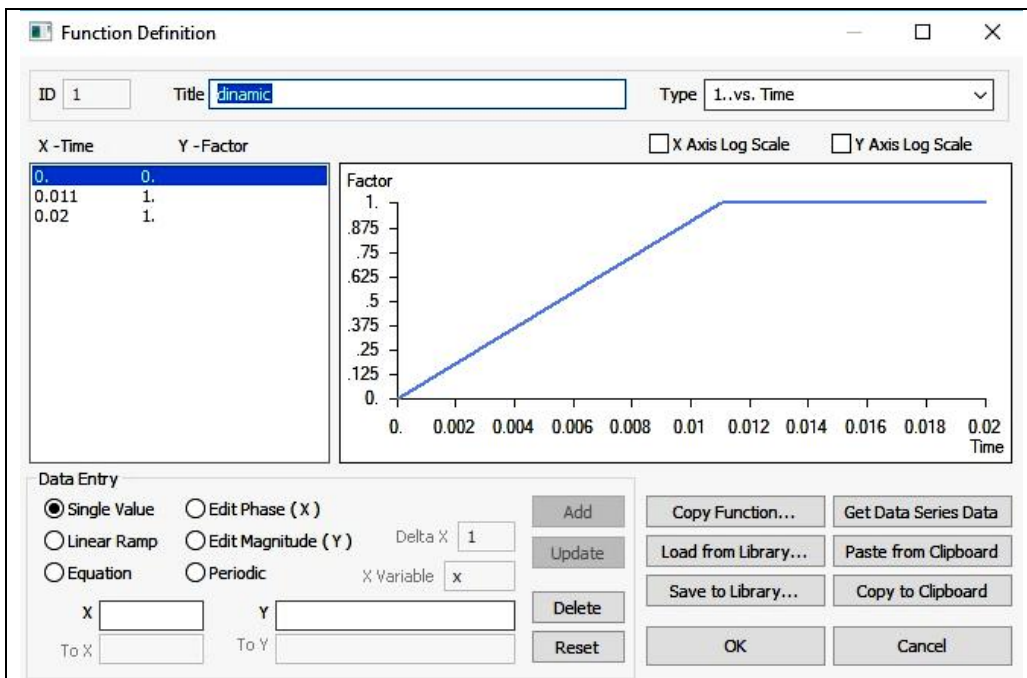


**Fig.2.11.** Distribuția tensiunilor Von Mises în modelul 1 cu valoare maximă pe elementul 684, modelare ne-lineară statică



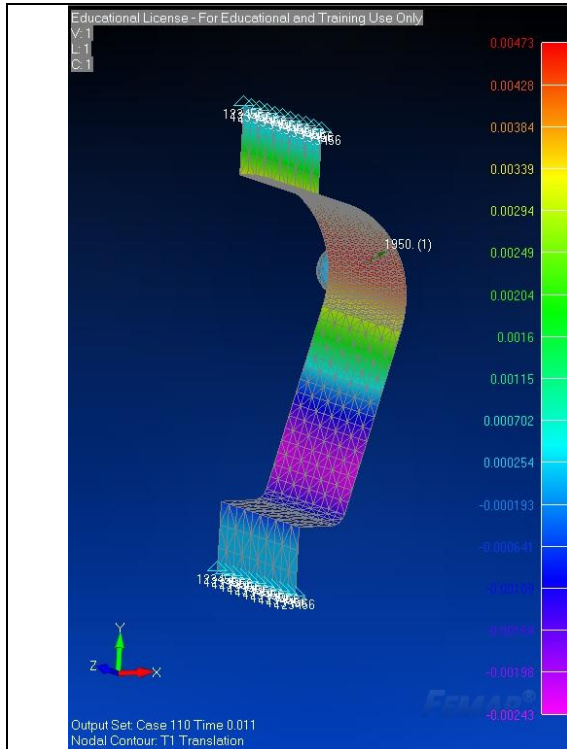
**Fig.2.12.** Distribuția tensiunilor Von Mises în modelul 2 cu valoare maximă pe elementul 680, modelare ne-lineară statică

**b) Modelarea dinamică a impactului în aplicația FEMAP 11.4**

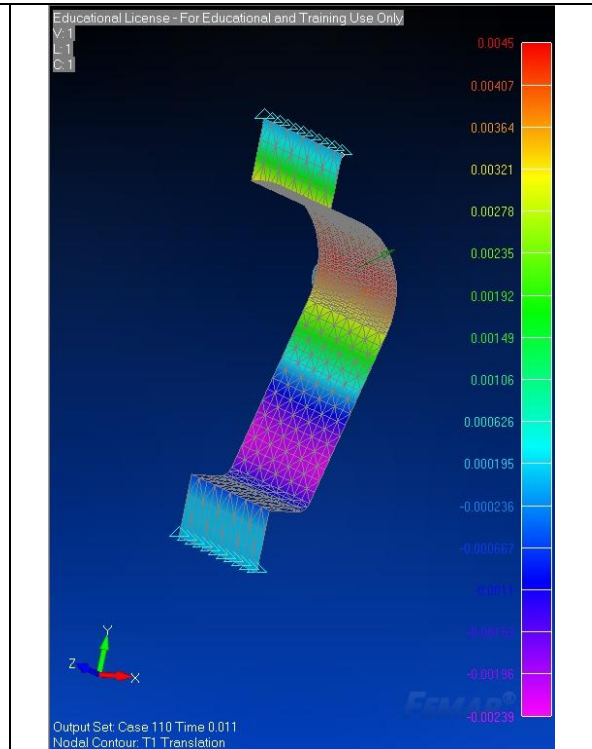


**Fig.2.13.** Descrierea factorului de încărcare a funcției de timp, după T=11ms, aceasta fiind constantă

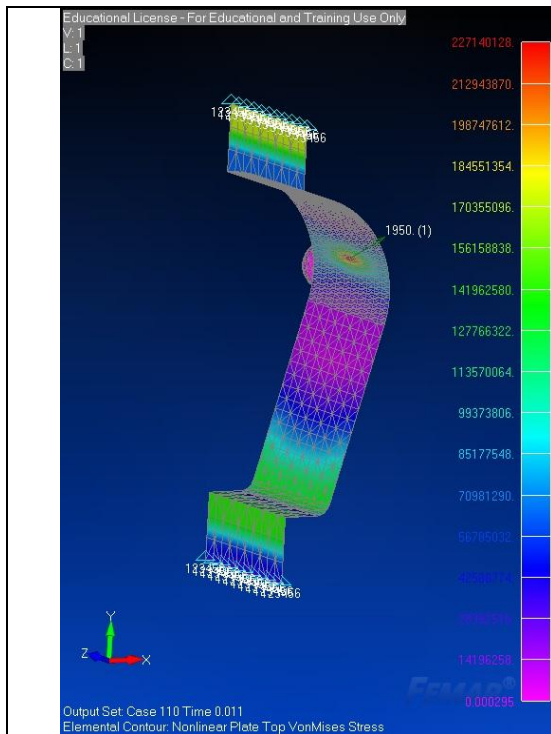




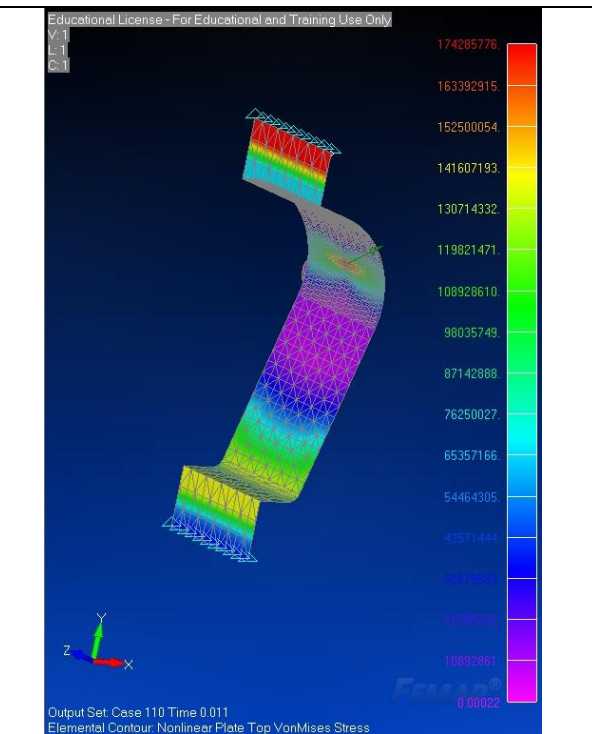
**Fig.2.14.** Distribuția deplasărilor punctelor pe axa X, în placa model 1 cu valoarea maximă în nodul 523, modelare ne-lineară avansată explicit dinamică



**Fig.2.15.** Distribuția deplasărilor punctelor pe axa X, în placa model 2 cu valoarea maximă în nodul 497, modelare ne-lineară avansată explicit dinamică



**Fig.2.16.** Distribuția tensiunilor Von Mises în modelul 1 cu valoare maximă pe elementul 684, modelare ne-lineară avansată explicit dinamică



**Fig.2.17.** Distribuția tensiunilor Von Mises în modelul 2 cu valoare maximă pe elementul 680, modelare ne-lineară avansată explicit dinamică

Pentru evaluarea corectă a comportamentului la impact al celor două plăci s-au calculat energiile de deformație specifice modelării statice.

## 2.2. Interpretarea rezultatelor referitoare la influența geometriei plăcilor asupra stării de tensiune și deformație

În Tabel 2.6 se observă că valoarea obținută la simularea numerică statică, realizată pentru modelul 2, este mai mică pentru deplasarea maximă a nodului impactat, în timp ce energia de deformație este mai mare.

**Tabel 2.6.** Rezultatele cercetării impactului prin simulare numerică statică în Femap 11.4

Obiect	Deplasări (mm)	Tensiuni Von Mises (MPa)	Energie de deformație. (J)
Model 1	5.01	235	4.85
Model 2	4.22	235	5.01

Valorile numerice obținute în analiza ne-lineară statică cu element finit, prezentate în Tabel 2.7, sunt comparabile cu cele experimentale fiind incluse într-o gamă acceptată, de 6.187% pentru modelul 1 și 8.293 % pentru modelul 2. În analiza ne-lineară explicită (dinamică) s-au obținut rezultate similare, de 5.588 % pentru modelul 1 și 6.635% pentru modelul 2.

**Tabel 2.7.** Variațiile deformațiilor pentru un impact cu  $F = 1950 \text{ N}$

Model	Deplasarea nodului maxim (mm)		
	Aramis HS	Femap 11.4	
		Tip analiză ne-lineară	
		Statică	Explicită
1	5.01	5.32	4.73
2	4.22	4.57	4.5

Influența curburii asupra solicitării plăcii la impact este menționată în Tabel 2.8.

**Tabel 2.8.** Analiza influenței formei asupra comportamentului plăcii curbe solicitată la impact

Tip analiză	Răspuns	Variația răspunsului modelului 2 față de modelul 1 (%)
Aramis HS	Deformații	-15.76
Femap 11.4	Deformații	- 4. 86

### 2.3. Concluzii

În studiul comparat al cercetării experimentale cu simularea numerică ne-lineară statică se observă că modificarea descrescătoare a curburii pentru modelul 2, ce înregistrează o creștere a razei cu 6 %, determină aceștia:

- scăderea deformațiilor cu 15.76 % experimental, 14.09 % la simularea numerică ne-lineară statică și 4.86 % la simularea numerică ne-lineară explicită;
- creșterea masei cu 1.25%.

Aceste concluzii sunt favorabile alegerii procedurii de schimbare a curburii folosite la modelul 2, pentru generarea noilor geometrii ale coastelor barjei de 2000 TDW. Pentru studiul comparativ al comportamentului la impact al structurilor se utilizează analiza ne-lineară explicită, pentru studiul dinamicii tensiunilor Von Mises.



### CAPITOLUL 3

## STUDIAREA PRELIMINARĂ A UNEI STRUCTURI NAVALE SOLICITATĂ LA IMPACT

#### Obiectivele acestui capitol sunt:

1. pre-procesarea datelor pentru implementarea modelului numeric al unei structuri navale;
2. analiza structurală a modelului solicitat la impact prin Metoda Elementelor Finite;
3. post-procesarea datelor;
4. identificarea parametrilor ce influențează fenomenul de impact

În domeniul naval fenomenul de impact este reglementat prin normele incluse în DNV GL-RP- 204 [51] emis în anul 2017, prin care se standardizează proiectarea ce asigură securitatea funcționării navelor în cazul solicitărilor accidentale ale structurii acestora. Acest fenomen este verificat, atât pentru obiectele care cad în aer, pe punte sau în apa (drop test) cât și pentru coliziunile navelor.

În acest capitol este prezentată analiza structurală numerică a unei structuri navale cu scopul verificării acesteia la impactul pe punte cu o energie de 100 kJ. Impactul a fost obținut prin căderea liberă a unei mase  $m = 2000$  kg, cu viteza  $v = 10$  m/s, de la o înălțime  $h = 5$  m/s, accelerația gravitațională fiind  $g = 9.81$  m/s<sup>2</sup>. Procesarea modelului este realizată integral cu aplicația software NX NASTRAN FEMAP 11.4.

#### 3.1. Studiul preliminar al unei structuri navale pentru analiza structurală

Etapele de pregătire a datelor în vederea realizării unei analize structurale prin Metoda Elementelor Finite ca etapă de pre-procesare a datelor. Ea cuprinde fazele de realizare, atât ale geometriei modelului CAD cât și ale modelului cu elemente finite. Modelul fizic este transpus în mediul digital fie prin scanarea obiectului fizic fie prin reprezentarea acestuia într-o aplicație CAD (AutoCAD, etc.), fiind sursă pentru realizarea modelului cu elemente finite.

##### 3.1.1 Modelarea geometriei unei structuri navale (modelare CAD)

A fost realizată modelarea 3D a geometriei probei barjei B2000T, folosind date dimensionale existente în documentația tehnică proiectată în anul 1985 de ICEPRONAV Galați (colectivul din Brăila), datele generale [52] fiind menționate în Tabel 3.1.

**Tabel 3.1.** Date generale de proiectare pentru barja B2000T [52]

Nr.	Denumire	Simbol	Date proiectare
1	Lungime maximă	L <sub>max</sub>	76.18 m.
2	Lungimea între perpendiculare	L <sub>pp</sub>	75.72 m.
3	Lățime	B	11.00 m.
4	Pescajul	T	3.02 m.
5	Distanța intercostală		0.50 m.
6	Distanța între plutiri		0.50 m.
7	Deplasament	Δ	338 t.
8	Capacitate de încărcare	TDW	2000 t.

Este modelată CAD doar o porțiune a probei ce conține zona cuprinsă între perețele etanș amplasat la coasta C120 și perețele etanș al puțului de lanț care începe la coasta C126. El cuprinde învelișul punții principale și bordajul până la zona întărită, aflată 3.6 m față de

puntea principală. Puntea este întărită cu 7 traverse și 3 longitudinale de punte, ultimele două dispuse simetric față de cea aflată în planul diametral. Bordajul este întărit cu 7 coaste, de la C120 la C126, C120 fiind ultima coastă a zonei cilindrice. Tabelul 3.2. prezintă datele de proiectare ale structurii, realizată în sistem de osatură transversal.

**Tabel 3.2. Date generale de proiectare pentru modelul CAD al barjei**

Nr.	Denumire	Dimensiune (mm)
1	Înveliș punte	8
2	Înveliș bordaj	6
3	Traverse de punte	L 80 x 65 x 10
4	Longitudinale de punte	T 200 x 80 x 6
5	Coaste de bord	L 80 x 65 x 6
6	Distanța intercostală	500
7	Distanța între longitudinale	1994 la pupa și 1850 la prova

Comenzile din meniurile Geometry și Modify [53] sunt utilizate pentru realizarea modelului parasolid CAD. Faza de modelare CAD este finalizată după verificarea contactelor dintre elementele structurii. Lipsa legăturilor dintre elementele geometriei determină completarea acestora cu noi curbe, pentru realizarea conectării între componentele structurii.

### 3.1.2 Modelarea structurală a geometriei unei structuri navale (Metoda Elementelor Finite)

Pentru realizarea unei analize structurale este necesară executarea discretizării suprafețelor geometriei prin Metoda Elementelor Finite. Impactul este un fenomen complex, nelinier, pentru ambele corpuri aflate în contact. S-a considerat că materialul supus solicitării este un material plastic-nelinier, cu întărire cinematică, definit printr-o curbă tensiune-deformație, cu proprietățile înregistrate în Tabel 3.3.

**Tabel 3.3. Proprietățile materialului ne-linear plastic**

Nr.	Proprietate	U.M.	Structură navală	Impactor
1	Grosime	mm	conform Tabel 3.2	120
2	Modulul lui Young	MPa	2.1x10 <sup>5</sup>	
3	Coeficientul Poisson	-	0.3	
4	Densitatea	tonă /mm <sup>3</sup>	7.85x10 <sup>-9</sup>	
5	Tensiunea de curgere	MPa	236.2	
6	Tensiunea limită	MPa	432.6	

Pentru modelare au fost alese inițial elemente de tip placă, CQUAD4 cu formulare teoretică Kirchoff.

O parte din elemente au fost modelate cu elemente tip CTRIA3, cu formă triunghiulară, ce a permis modelarea adecvată a anumitor părți ale plăcilor curbe, cu realizarea contactului între componentele structurii.

Calitatea mesh-ului, în particular densitatea acestuia, influențează rezultatele analizei structurale [54]. În domeniul naval elementele de mesh trebuie să respecte normele DNVGL-CG-0127 [55] prin care este apreciată calitatea acestora. Aplicația NX NASTRAN FEMAP

permite compararea elementelor cu tipul de element inițial ales, printr-o serie de indicatori (planeitate, proporție, distorsiune, pas de timp explicit, etc.). Cel mai important indicator este determinantul iacobian prin care se verifică abaterea formei elementului față de o formă ideală, cu valori acceptate între 0 și 1.

Pentru cele două corpuri supuse impactului a fost făcută verificarea acestor indicatori, obținându-se pentru structura navală un iacobian=0.860 și valori valide pentru zona de impact (iacobian=0.52, aspect ratio=2.44 și warping= $1.2 \times 10^{-6}$ ).

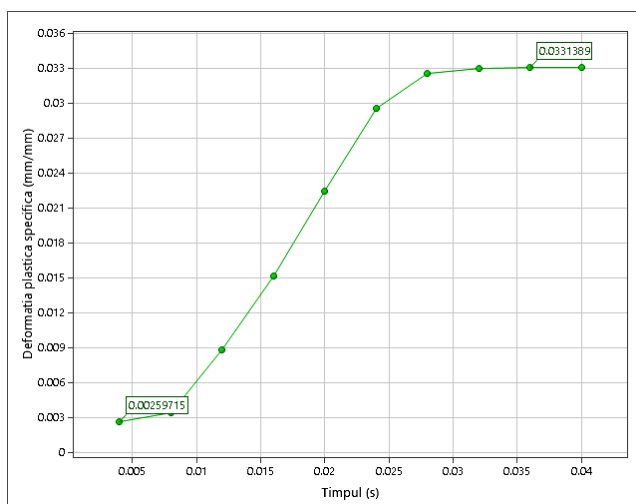
Structura navală a fost impactată pe punte de un impactor compus dintr-o semisferă și un cilindru având datele de proiectare precizate în Tabel 3.5. Proprietățile de material sunt menționate în Tabel 3.3.

**Tabel 3.5.** Date de proiectare ale geometriei impactorului

Nr.	Obiect	Dimensiune	U.M.
1	Rază semisferă	300	mm.
2	Cilindru	700	mm.

### 3.2. Analiza structurală a unei structuri navale solicitate la impact (Metoda Elementelor Finite)

Fenomenul de impact a fost modelat cu ajutorul analizei dinamice din software, numită Advanced Nonlinear Explicit. Contactul fiind neliniar a fost simulat prin metoda corecțiilor, definindu-se regiuni. Pentru studiul comportamentului prin analiza numerică a unei structuri navale solicitată la impact, în literatura de specialitate sunt utilizate date obținute experimental [46, 56]. În această lucrare se folosesc valorile coeficientului de frecare alese din literatura științifică ce studiază impactului structurilor metalice navale [6].



**Fig. 3.9.** Variația deformației plastice specifice a punții, element 140, T= 40ms,  $\mu=0.6$ .

Structurile barjei neincluse în analiza structurală au fost reprezentate prin condiții de limită, cu blocarea deplasărilor, după direcțiile axelor X și Y, și a rotirii după axa Z.

Pentru determinarea duratei analizei s-a realizat inițial o rulare pentru 40 milisecunde. A fost analizată diagrama deformației plastice specifice prezentată în Fig. 3.9, în care se observă că această deformație stagnează după 32 milisecunde.

S-a ales ca timp de rulare  $t= 40$ ms, pentru cele 3 analize ce folosesc proprietățile de material prezentate în Tabel 3.6, pentru fiecare valoare a coeficientului de frecare.

**Tabel 3.6. Proprietățile materialului S235  
conform DNV-GL [57]**

Nr.	Deformație specifică (mm/mm)	Tensiune (MPa)
1	0	0
2	0.004	236.2
3	0.0198	243.4
4	0.1817	432.6

### 3.3. Post-procesarea datelor

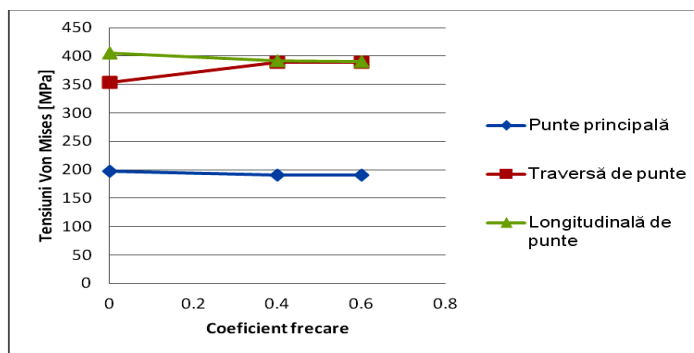
Au fost determinate valorile maxime pentru deplasările totale, tensiunile Von Mises și tensiunile de forfecare.

Rezultatele analizelor, pentru fiecare componentă a structurii navale impactate în nodul 150, element 140, după finalizarea impactului, sunt prezentate tabelar.

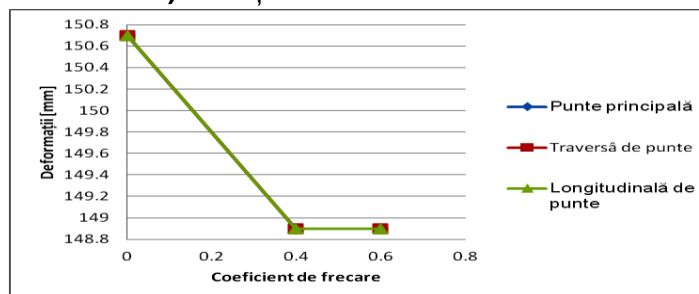
Analizând rezultatele se observă o influență a coeficientului de frecare asupra tensiunilor apărute în structură în urma impactului, înregistrate în varianta a) a Fig. 3.17.

În această diagramă, pe abscisă, sunt înregistrate valorile coeficientului de frecare iar pe ordonată valorile tensiunii Von Mises aferente structurii impactate. Același raționament se aplică și pentru varianta b) a Fig. 3.17, unde sunt ilustrate valorile pentru deformațiile din structură.

Impactorul a cauzat o deformare plastică a punții, pentru coeficientul de frecare,  $\mu=0.6$ , cu valoarea 0.0331 mm/mm. Aceasta este acceptată, conform regulilor societății de clasificare DNV GL [58], structura navală demonstrând siguranță în navigație în urma impactul prezentat.



a) Variația tensiunilor Von Mises



a) Variația deformațiilor

**Fig. 3.17** Influența coeficientului de frecare asupra tensiunilor Von Mises și a deformațiilor datorate impactului asupra structurii navale cu  $E= 100 \text{ kJ}$  ( $v=10 \text{ m/s}$ )



### 3.4. Concluzii

Din analiza datelor din variantele a) și b) ale Fig. 3.17 rezultă următoarele concluzii:

1. Elementele finite ce definesc structura navală și impactorul respectă normele de modelare numerică prescrise în DNVGL-CG-0127.
2. Solicitarea structurii navale cu o energie de 100 kJ ( $v=10\text{m/s}$ ) determină modificări ale structurii, respectiv o deformare plastică a punții cu valoarea 0.0331 mm/mm, pentru  $\mu=0$ , permisă conform normelor societăților de clasificare, care acceptă maxim 5% pentru acest criteriu.
3. Frecarea influențează fenomenul de impact doar prin includerea ei în analiză, mai puțin prin valoarea coeficientului de frecare.
4. Coeficientul de frecare are o influență mică asupra deformațiilor elementelor structurii impactate, acestea fiind egale între ele, cu valoarea 148.9 mm, pentru ambii coeficienți de frecare.
5. Coeficientul de frecare influențează mărimea tensiunilor Von Mises, cea mai mare fiind asupra longitudinalelor și cea mai mică asupra punții, 391.6 MPa, respectiv 190.3 MPa, pentru  $\mu=0.4$ .
6. Coeficientul de frecare influențează mărimea tensiunilor de forfecare, cea mai mare fiind asupra longitudinalelor și cea mai mică asupra punții, 218.6 MPa, respectiv 93.09 MPa, pentru  $\mu=0.4$ .
7. Coeficientul de frecare determină scăderea deformațiilor cu 1.19% pentru toate elementele structurii, pentru ambii coeficienți de frecare.
8. Coeficientul de frecare determină atât scăderea tensiunilor Von Mises pentru punte și longitudinale, cât și creșterea tensiunilor pentru traverse, influența cea mai mare fiind asupra traverselor și cea mai mică asupra punții, cu 10.4% pentru  $\mu=0.4$ , respectiv 3.25% pentru  $\mu=0.6$ .
9. Coeficientul de frecare determină atât scăderea tensiunilor de forfecare pentru punte cât și creșterea tensiunilor pentru traverse și longitudinale, influența cea mai mare fiind asupra longitudinalelor și cea mai mică asupra punții, cu 11.1% pentru  $\mu=0.4$ , respectiv 0.08% pentru  $\mu=0.6$ .

Aceste concluzii sunt favorabile utilizării coeficientului de frecare, ca parametru al analizei la coliziune a bordajului, pentru a studia influența geometriei coastelor barjei B2000T solicitate la tracțiune și încovoiere în timpul impactului.



## CAPITOLUL 4

### STUDIUL INFLUENȚEI GEOMETRIEI ASUPRA TENSIUNILOR UNEI STRUCTURI NAVALE SOLICITATĂ LA IMPACT

**Obiective sunt următoarele:**

1. studierea influenței frecării asupra impactului lateral al unei structuri navale;
2. studierea influenței geometriei asupra tensiunilor rezultate din impact;
3. identificarea unei modalități de diminuare a tensiunilor Von Mises rezultate în timpul impactului.

Navigația fluvială deține în prezent o pondere însemnată în ansamblul transporturilor de marfuri, în Europa centrală aceasta fiind o treime din totalul traficului [59, 60]. În anul 2011, pe fluviul Dunărea inclus în Coridorul VII Pan-european, România a realizat 58.4 % din total transporturilor de mărfuri pe canale navigabile [61]. Aceste activități pot fi perturbate de accidente navale datorate impactului cu butucii din lemn plutitori sau cu elementelor de susținere ale podurilor [62, 63, 64], ori condițiilor meteo nefavorabile ce pot determina avarierea structurii barjelor impactate.

În vederea proiectării unei structuri navale cu o rezistență sporită la impact a fost realizată, în acest capitol, simularea unei coliziuni laterale cu o energie de 1 kJ.

Aceasta a fost obținută prin impactarea laterală a structurii bordajului cu o masă  $m=2000$  kg, cu viteza  $v=1$  m/s. Procesarea modelului este realizată integral cu aplicația software NX NASTRAN FEMAP 11.4 [65,66].

#### 4.1. Studiarea unei structuri navale solicitată la impact lateral

##### 4.1.1. Alegerea procedurii pentru impactarea unei structuri navale

Modul de comportare a structurii la impact a fost studiat prin amplasarea impactorului ce a acționat după o direcție perpendiculară pe direcția de înaintare a barjei, în trei puncte ale bordajului cu curburi diferite ale coastelor. Analiza structurală numerică folosește atât modelul geometric al structurii navale cât și al impactorului, descrise în capitolul 3, cu aceleași proprietăți de material. Coliziunea structurii navale este realizată lateral, în bordaj.

Modelul numeric al suprafeței laterale impactate, compusă din bordaj și coastele corespondente este realizat cu metoda elementelor finite a căror calitate a mesh-ului este prezentată în Tabel 4.1, cu respectarea normelor DNV-GL-RP-C208 [57].

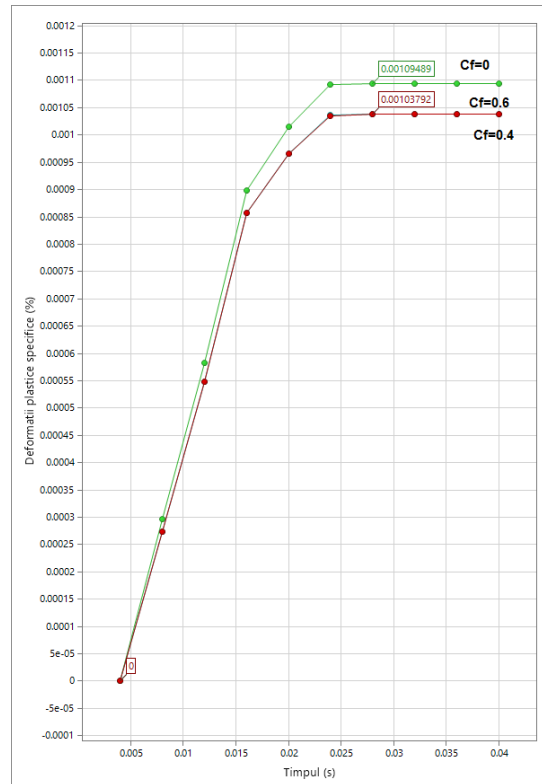
**Tabel 4.1. Variația calității elementelor în zona impactată**

Zonă impact	Indicator calitate mesh	
	Jacobian	Aspect ratio
Bordaj	0.597	3.035

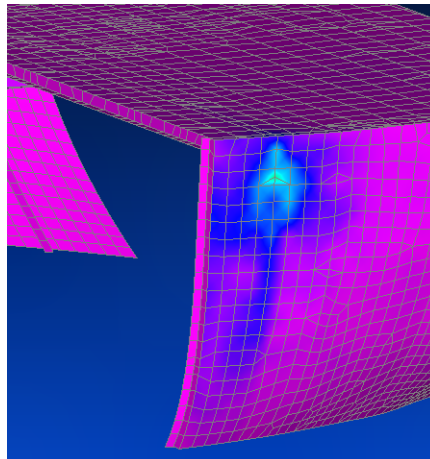
##### 4.1.2. Analiza structurală a modelului supus la impact lateral

Structura navală este impactată cu o energie  $E=1$  kJ, rezultată prin ciocnirea impactorului de masă  $m=2000$  kg, cu viteza  $v=1$  m/s. Impactarea se realizează în trei puncte cu curburi diferite ale bordajului, la nivelul ultimei plutiri (la  $Y=3$  m. față de planul de bază aflat pe fundul barjei). Punctele de impact se aleg în zonal coastelor C121, C123 și C125, curbura cea mai mică fiind la C121.

Analiza este realizată pentru un timp  $T=40$  ms, pâna la finalizarea deformației plastice indicată printr-o valoare constantă a acesteia, exemplificată în Fig. 4.2



**Fig. 4.2.** Variația deformației plastice specifice , pentru elementul 4807, la impactul în zona coastei C121 (x=64.62 m, y=3.19 m, z= 5.49 m), E=1kJ (v=1m/s), T= 40ms



**Fig. 4.3.** Variația tensiunilor Von Mises ale bordajului impactat în zona coastei C121 cu E= 1 kJ, Tt= 40 ms,  $\mu=0.6$

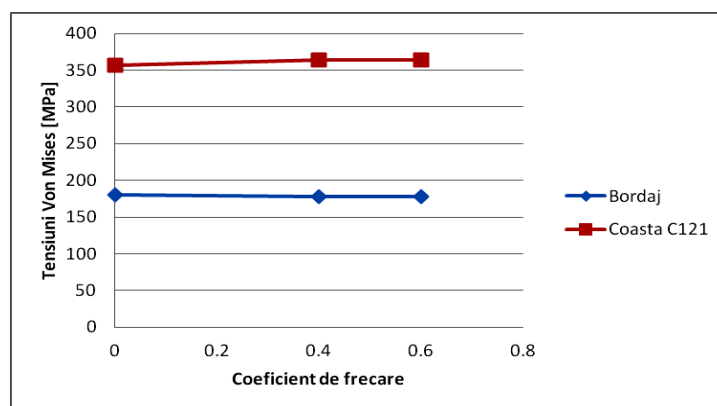
Se observă din diagrama din Fig.4.3 că fenomenul de impact se manifestă dominant local, în jurul punctului de impact, pe bordaj și osatură. Răspunsul structurii la nivelul punții este minor, efectele coliziunii manifestându-se, ca intensitate, mai mult la nivelul osaturii, în timp ce pe bordaj suprafața afectată de impact este mai mare.

Rezultatele analizelor după finalizarea impactului, pentru fiecare componentă a structurii navale impactate, sunt prezentate tabelar.

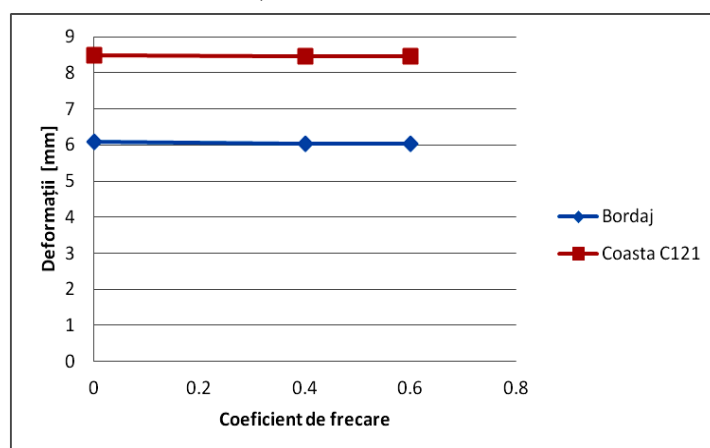
## 4.1.3. Interpretarea rezultatelor

Din analiza datelor prezentate a rezultat influența frecării asupra fenomenului de impact, ilustrat în graficele din Fig. 4.9.

În varianta a) a Fig. 4.9, pe abscisă, sunt figurate valorile coeficientului de frecare iar pe ordonată valorile tensiunilor Von Mises din structură, în zona coastei C121. Același raționament se aplică și pentru varianta b) a Fig. 4.9 unde sunt ilustrate valorile pentru deformațiile din structură, aferente coastei C121. Celelalte grafice prezintă rezultate similare, datorate impactului în zona coastelor C123 și C125.



a) Variația tensiunilor Von Mises



b) Variația deformațiilor

**Fig. 4.9** Influența coeficientului de frecare asupra variației tensiunilor Von Mises și a deformațiilor rezultate după impactul asupra structurii navale cu  $E=1$  kJ ( $v=1$  m/s) în zona coastei C121 ( $x=64.62$  m,  $y=3.19$  m,  $z=5.49$  m)

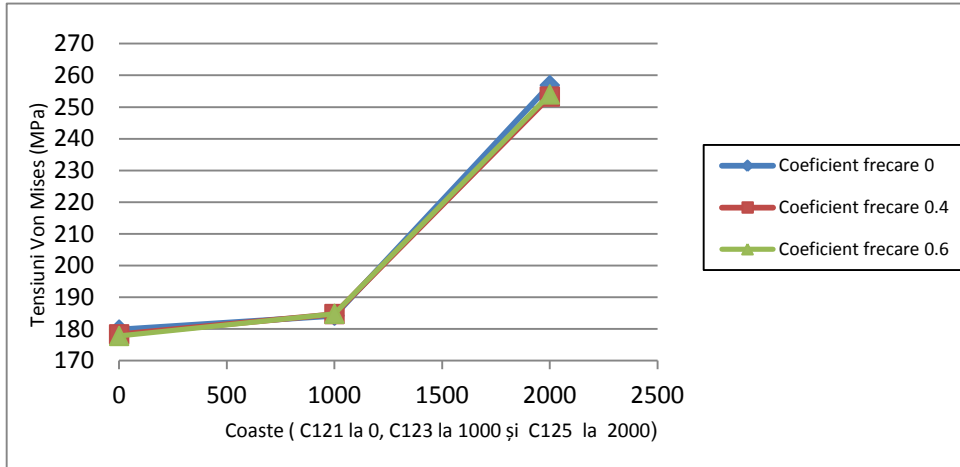
Se observă că valoarea coeficientului de frecare determină scăderea valorilor deformațiilor totale ale nodurilor bordajului și coastelor, influența fiind mai mare asupra bordajului. Deformațiile au valori identice pentru cele două variante ale parametrului, pentru fiecare din componentele analizate, cu excepția valorilor pentru bordajul aferent C121.

Prezența frecării determină atât scăderea tensiunilor Von Mises pentru elemente bordajului aferente C121 și C125, pentru elementele coastei C123 cât și creșterea tensiunilor pe elementele coastelor C121 și C125 și elementele de bordaj aferent C123, influență mai mare fiind asupra bordajului aferent C125 și elementelor coastelor C121.

Acest parametru influențează tensiunile de forfecare, ce au valori mari corespunzătoare elementelor coastei C121 și elementele bordajului aferent coastei C125.

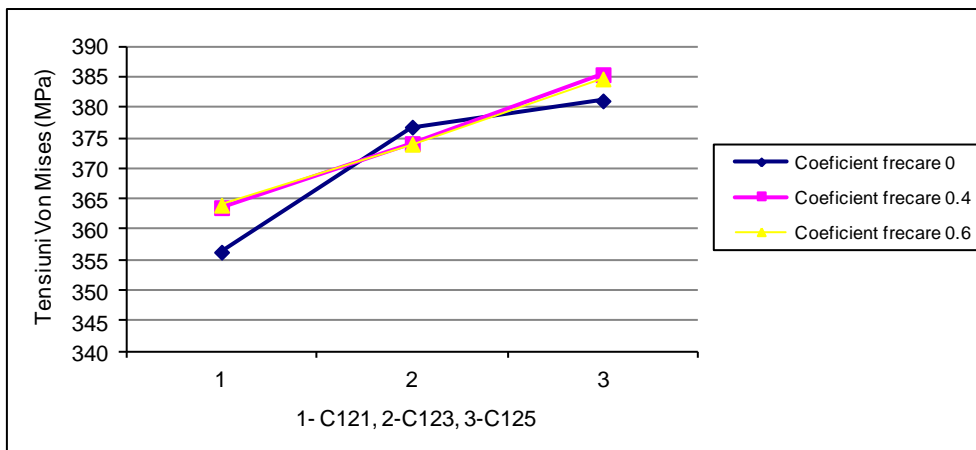
## 4.2. Studiarea influenței geometriei asupra tensiunilor rezultate din impact

Studierea influenței geometriei asupra tensiunilor datorate impactului lateral se realizează prin analiza tensiunilor Von Mises apărute în elementele bordajului, impactate la nivelul coastelor C121, C123 și C125, prezentate în tabelele din paragraful 4.1.2. Diagrama din Fig. 4.12 ilustrează variația tensiunilor Von Mises de-a lungul bordajului, originea fiind în dreptul coastei C121, celelalte coaste aflându-se la distanța intercostală egală cu 500 mm.



**Fig. 4.12.** Influența geometriei asupra tensiunilor Von Mises ale învelișului impactat cu  $E = 1 \text{ kJ}$  ( $v=1\text{m/s}$ ), în zona coastelor C121, C123 și C125

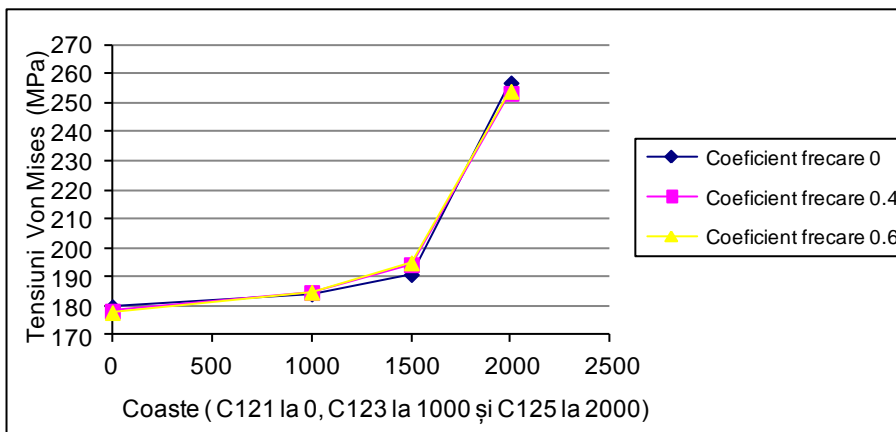
Se observă o creștere a tensiunii Von Mises de la valoarea 177.8 MPa pentru elementele aflate pe o suprafață cu o curbură mică, în vecinătatea zonei cilindrice poziționată la C120, spre prova, caracterizată de o curbură mai mare a suprafeței bordajului aferent C125, unde se obține valoarea maximă de 254 MPa, pentru  $\mu=0.6$ .



**Fig. 4.13** Influența geometriei asupra tensiunilor Von Mises ale osaturii, pentru impactatul cu  $E = 1 \text{ kJ}$  ( $v = 1 \text{ m/s}$ ), în zona coastelor C121, C123 și C125

Similar se observă o creștere a tensiunilor Von Mises, spre prova, de la coasta C121 la C125, respectiv de la 364 MPa la 384.7 MPa, ilustrate în diagrama din Fig. 4.13.

Tendența de creștere a tensiunilor este observată și în diagrama din Fig. 4.14, în care sunt prezentate rezultatele impactului lateral al bordajului în dreptul coastei C124, aflată între C123 și C125, în condiții de analiză similare celorlalte 3 simulări numerice.

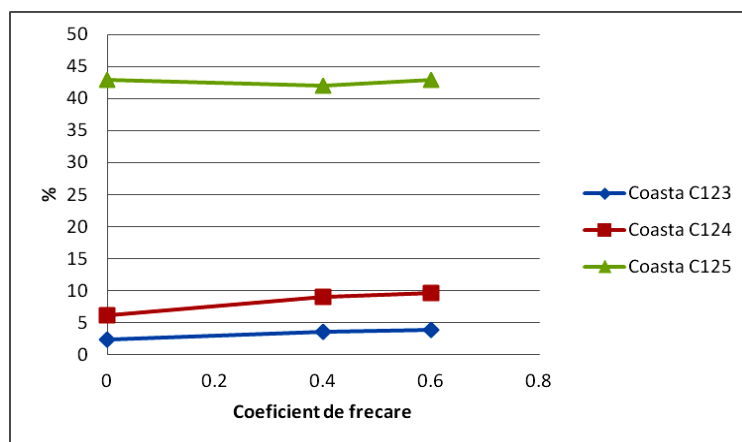


**Fig. 4.14.** Influența geometriei asupra tensiunilor Von Mises ale învelișului impactat cu  $E = 1 \text{ kJ}$  ( $v=1 \text{ m/s}$ ), în zona coastelor C121, C123, C124 și C125

Curbele din diagrama Fig. 4.14, obținute pentru cei doi coeficienții de frecare, 0.4 respectiv 0.6, ilustrează mai fidel creșterea tensiunilor funcție de creșterea curbării bordajului de-a lungul axei X, spre prova. În Tabel 4.9 și varianta a) a Fig. 4.15 sunt prezentate variațiile procentuale ale tensiunilor Von Mises față de coasta C121.

**Tabel 4.9.** Variația relativă a tensiunilor Von Mises ale bordajului față de C121 ( $x=64.62 \text{ m}$ ,  $y=3.19 \text{ m}$ ,  $z= 5.49 \text{ m}$ )

Coeficient de frecare, $\mu$	C123	C124	C125
0.	2.44	6.17	42.88
0.4	3.58	8.97	42.06
0.6	3.93	9.61	42.85
Distanța pe axa X față de C121, ca origine, spre prova (mm.)	1000	1500	2000



a) Variația tensiunilor Von Mises exprimate procentual față de coasta C121

**Fig. 4.15.** Influența geometriei asupra variației tensiunilor Von Mises și deformațiilor din tabla bordajului, funcție de coeficientul de frecare

### 4.3. Modalități de diminuare a tensiunilor Von Mises rezultate în timpul impactului

Se observă în diagramele din Fig.4.12, Fig. 4.14 și varianta a) a Fig. 4.15 o creștere a tensiunii Von Mises ca urmare a impactării bordajului în dreptul coastei C125. Pentru diminuarea acestui efect este necesară alegerea unei noi geometrii, prin modificarea caracteristicilor geometrice ale structurii, în vederea menținerii în funcțiune a navei după impactare. Având la bază rezultatele simulărilor prezentate, se propune o modalitate de modificare a grosimii tablei structurii în zona de impact. Aceasta reprezintă o rezolvare fără urmări majore din punct de vedere hidrodinamic, corectarea asietei datorată majorării masei putându-se realiza rapid.

**Tabel 4.10.** Variante de reproiectare a geometriei structurii navale

Nr.	Varianta	Grosime tablă (mm)		Masa structură (tone)	Modificare masă (%)
		Înveliș afereant C125	Coasta C125		
1	inițială	6	6	4.644	-
2	I	6	7	4.751	2.30
3	II	7	6	4.896	5.42

Soluția de majorare a grosimii tablelor este ilustrată în Tabel 4.10, în care sunt prezentate două variante de modificare a grosimii tablelor, corespunzătoare coastei C125 pentru varianta 1, și modificări ale grosimii tablei bordajului aferent coastei C125, pentru varianta II.

Modificări ale masei structurii navale cu 2.30% respectiv 5.42% față de masa inițială nu produc modificări majore ale flotabilității barjei.

Din analizele structurale la impact, realizate în condiții similare de simulare, pentru cele două variante de geometrii modificate, au rezultat datele înregistrate tabelar.

#### 4.3.1 Studierea influenței frecării asupra impactului lateral al structurii navale cu geometrie reproiectată

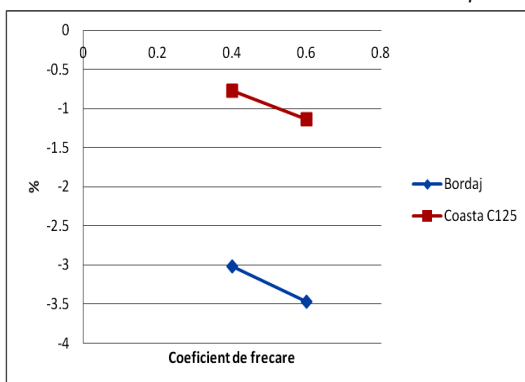
Din analiza datelor prezentate tabelar rezultă influența frecării asupra fenomenului de impact, înregistrată procentual în diagramele varianta a) ale Fig. 4.16 și Fig. 4.17, pentru cele două variante ale noilor geometrii, conform datelor din Tabel 4.10.

Se observă că valoarea coeficientului de frecare determină scăderea valorilor tensiunilor Von Mises ale nodurilor bordajului și coastelor, influența fiind mai mare asupra bordajului în varianta coastei C125 reproiectate.

Prezența frecării determină scăderea tensiunilor Von Mises pentru elemente bordajului și elementelor aferente coastei C125, influență mai mare fiind asupra elementelor bordajului reproiectat.

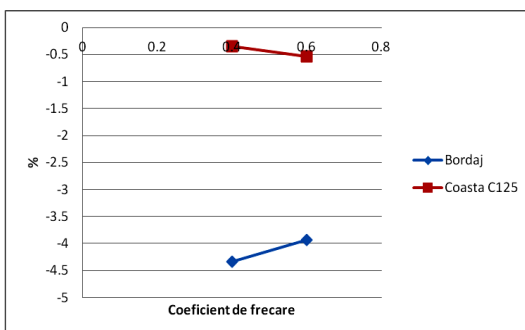
Acest parametru influențează tensiunile de forfecare, prin scăderea acestora, cu valori mai mari pentru elementele bordajului reproiectat, aferent C125.





a) Variația tensiunilor Von Mises

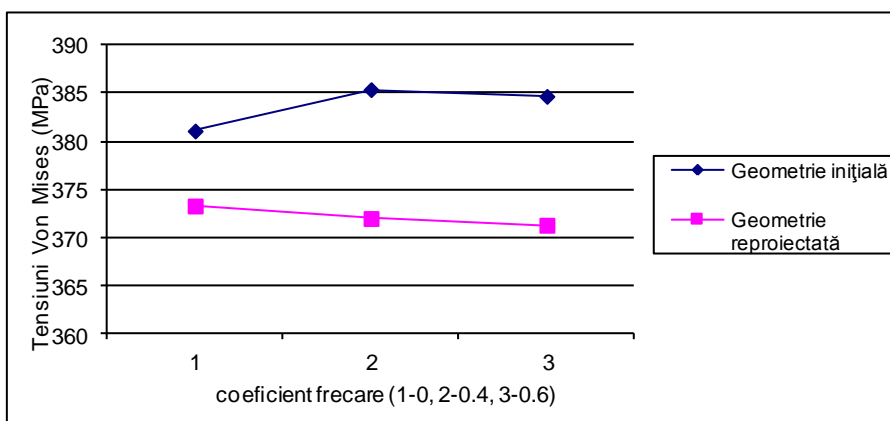
**Fig. 4.16.** Influența coeficientului de frecare asupra variației tensiunilor Von Mises rezultate după impactul asupra structurii navale cu  $E= 1 \text{ kJ}$  ( $v=1 \text{ m/s}$ ) în zona coastei C125 reproiectată (Varianta I)



a) Variația tensiunilor Von Mises

**Fig. 4.17.** Influența coeficientului de frecare asupra variației tensiunilor Von Mises rezultate după impactul asupra structurii navale cu  $E= 1 \text{ kJ}$  ( $v=1 \text{ m/s}$ ) în zona învelișului coastei C125 reproiectat (Varianta II)

4.3.2 Studiarea influenței geometriei asupra tensiunilor rezultate din impactul structurii navale reproiectată

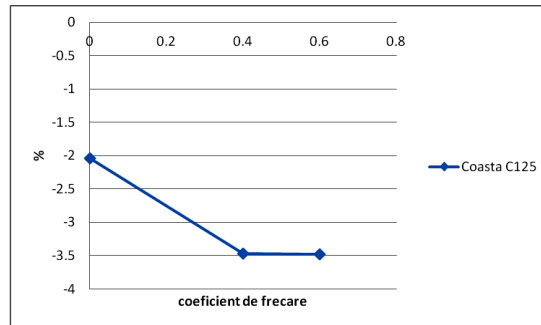


**Fig. 4.18.** Studiul comparat al influenței coeficientului de frecare asupra tensiunilor Von Mises din osatură pentru cele două variante de geometrii (Varianta II)

Analizând datele tabelare se observă că tensiunile Von Mises se diminuează mai mult pentru elementele coastei C125, pentru varianta II la care s-a modificat grosimea bordajului cu

un 1 mm, aferent acestei coaste. În diagrama din Fig. 4.18 se observă că aceste tensiuni scad pentru geometria reproiectată indiferent de valoarea coeficientului de frecare.

În diagrama din Fig 4.19 sunt prezentate valorile procentuale ale diminuării tensiunilor Von Mises ale geometriei modificate față de geometria inițială.



**Fig. 19.** Studiul comparat al influenței geometriei asupra variației tensiunilor Von Mises din tabla învelișului reproiectat în zona coastei C125 (Varianta II)

#### 4.4. Concluzii

Din analiza numerică, cu includerea frecării în timpul impactului lateral al bordajului structurii navale cu o energie  $E=1$  kJ ( $v=1$  m/s), poziționată în trei puncte cu curburi diferite ale bordajului, la deasupra nivelului ultimei plutiri aflate la  $Y=3$  m. au rezultat următoarele concluzii:

1. Valoarea coeficientului de frecare determină scăderea valorilor deplasării totale ale nodurilor învelișului și coastelor, influența fiind mai mare asupra învelișului.
2. Deformațiile totale au valori identice pentru cele două variante ale parametrului, pentru fiecare din componentele analizate, cu excepția valorilor pentru învelișul aferent C121.
3. Prezența frecării determină atât scăderea tensiunilor Von Mises pentru elementele învelișului aferente C121 și C125, pentru elementele coastei C123 cât și creșterea tensiunilor pe elementele coastelor C121 și C125 și elementele de înveliș aferent C123 - influență mai mare se manifestă asupra învelișului aferent C125, cu  $-1.40\%$  și asupra elementelor coastelor C121 cu  $2.16\%$ .
4. Coeficientul de frecare influențează tensiunile de forfecare, cu creșterea maximă de  $2.33\%$  corespunzătoare elementelor coastei C121 și cu scăderea maximă de  $2.32\%$  pentru elementele învelișului aferent coastei C125.
5. Tensiunile Von Mises cresc odată cu creșterea curburii de-a lungul învelișului spre prova, de la valoarea  $177.8$  MPa la coasta C121 la valoarea  $254$  MPa în zona coastei C125, pentru  $\mu=0.6$ , ce reprezintă o creștere de  $42.85\%$ .
6. Tensiunile Von Mises cresc odată cu creșterea curburii osaturii spre prova, de la valoarea  $364$  MPa în zona coastei C121 la valoarea  $384.7$  MPa în zona coastei C125, ce reprezintă o creștere de  $5.68\%$ .
7. Creșterea grosimii tablelor învelișului (de la  $6$  mm la  $7$  mm) cu  $16.6\%$ , ce determină o creștere a masei structurii cu  $5.42\%$ , conduce la diminuarea variației tensiunilor Von Mises cu  $3.47\%$  față de valorile similare geometriei inițiale, pentru coasta C125 (varianta II).
8. Creșterea grosimii tablelor învelișului (de la  $6$  mm la  $7$  mm) cu  $16.6\%$  determină o diminuare a tensiunilor Von Mises de  $3.68\%$  ale coastei C125 față de valorile similare ale coastei C121 (varianta II).

În urma studiului efectuat s-au tras concluzii referitoare la starea de deformație la atingerea stadiului plastic de deformare.

## CAPITOLUL 5

### STUDIUL INFLUENȚEI GEOMETRIEI ASUPRA RUPERII UNEI STRUCTURII NAVALE SOLICITATĂ LA IMPACT

**Obiectivele capitolului sunt următoarele:**

1. realizarea scenariilor de impactare a structurii navale nemodificată;
2. evaluarea efectelor datorate impactului (deformații plastice, volumele avariate, dimensiunile zonelor avariate);
3. realizarea scenariilor de impactare a structurii navale reproiectată pentru analiza efectelor;
4. identificarea soluțiilor de proiectare a geometriei pentru diminuarea efectelor coliziunii rezultate în structură.

În urma coliziunilor navale, datorită energiilor mari implicate (maselor mari aflate în mișcare cu diverse viteze), navele pot fi grav avariate cu pierderea siguranței referitoare la navigarea acestora. În funcție de marfa transportată, care poate fi pierdută în masa de apă, se poate ajunge la poluarea mediului înconjurător. Chiar dacă pe apele interioare există un coeficient de risc redus de producere a accidentelor navale, scufundarea unei nave poate bloca șenalul navigabil, cu mari efecte economice. O astfel de situație a fost creată la 2 septembrie 1991, odată cu scufundarea navei "Rostock" la mila 31 pe Dunăre, ce naviga sub pavilion ucrainean și care a blocat până în anul 2005 buna navigare pe brațul Sulina, fiind necesari peste 5.000.000 euro pentru eliberarea canalului. În data de 29 iunie 2003 a fost evitată blocarea șenalului navigabil al Dunării, la kilometrul 356, unde a avut loc impactul a două barje. S-a reușit evitarea scufundării barjei bulgărești, datorită manevrelor executate de comandantul împingătorului "Tsar Kaloian" care naviga în aval, rezultând o avarie în bordul tribord al barjei, de peste 1 metru. Barja a intrat în coliziune cu o barjă românească, desprinsă în mod accidental din convoiul românesc, condus în amonte de împingătorul "Cozia". Ambele convoaie de barje nu transportau marfă.

Se observă că o analiză a structurii învelișului unei barjei supusă la impact, în zona prova, poate constitui o previziune utilă, în scopul îmbunătățirii proiectării geometriei structurii acesteia.

În acest capitol este realizată analiza structurală a unei structuri navale supusă la impact pentru determinarea influenței geometriei structurii asupra siguranței acesteia. Au fost realizate 18 scenarii de impact, în 3 zone diferite ale structurii navale, descrise în capitolul 3 (vezi §3.1). Energiile de impact, de 100kJ și 400kJ (studiul C) au fost simulate și generate de un impactor cu masa de 2000 kg. ce se deplasează cu 10 m/s, respectiv 20 m/s, cu diferite valori ale coeficientului de frecare. Pentru studierea ruperii, structura a fost supusă coliziunii cu energiile de 100kJ și 144kJ (studiul D), produse de același impactor care se deplasează cu 10m/s, respectiv 12m/s. Coliziunile, analizate prin alte 18 scenarii, sunt realizate în aceleași zone și în aceleași condiții de frecare, similare celor 18 scenarii anterior descrise. Pentru analiza modalităților de diminuare a daunelor datorate impactului cu cele două energii au fost realizate 36 de scenarii (varianta I, varianta II și varianta III).

#### 5.1. Scenarii ale impactului în bordul tribord al unei structuri navale

Deoarece fenomenele care au loc în cazul impactului structurilor navale conduc la deformații plastice mari, producându-se chiar ruperea învelișului și a structurii interioare a corpului navei, calculele uzuale nu mai sunt valabile. Astfel se vor folosi metode numerice neliniare de calcul.

Au fost realizate simulări numerice folosind metoda nelineară cu elemente finite pentru a produce date pentru 18 scenarii de coliziune ale structurii navale.

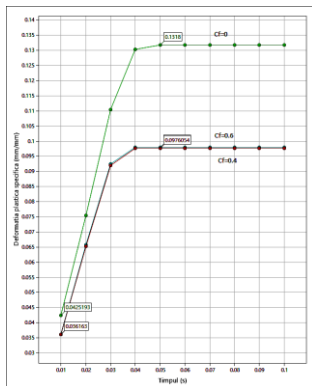
**Tabelul 5.1** Lista nodurilor și elementelor utilizate la analiza structurii navale

Date geometrice/ analiză structurală	Nod	Element	
	Bord	Coastă	Bord
Coasta C121	828	712	4807
Coasta C123	478	651	4924
Coasta C125	812	701	4620

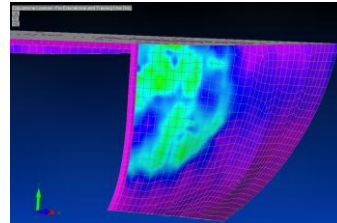
Lista nodurilor și elementelor utilizate pentru prelucrarea rezultatelor sunt menționate în Tabelul 5.1. Structura navală este solicitată la impact în trei zone, cu două valori ale energiei cinetice (studiul C). Datele de proiectare, atât ale structurii navale și ale impactorului cât și ale analizei structurale, sunt cele prezentate în capitolul 3 (vezi §3.1). Poziția punctelor de impact este cea precizată în capitolul 4 (vezi §4.1).

#### 5.1.1. Evaluarea efectelor impactului pentru cazul energiei de impact de 100 kJ

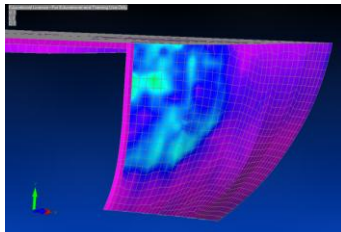
Diagramele din Fig 5.1 și Fig. 5.3 ilustrează variația deformațiilor plastice specifice și variația tensiunilor Von Mises la impactul învelișului în zona coastelor C121 și C125.



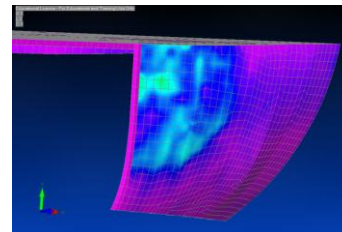
**a)** Variația deformațiilor plastice specifice ale învelișului, pentru elementul 4807



**b)** Variația tensiunilor Von Mises pentru înveliș,  $\mu=0.0$



**c)** Variația tensiunilor Von Mises pentru înveliș,  $\mu=0.4$



**d)** Variația tensiunilor Von Mises pentru înveliș,  $\mu=0.6$

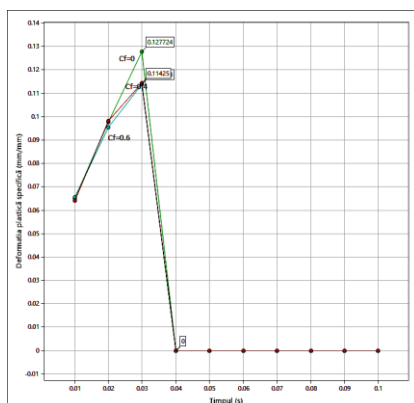
**Fig. 5.1** Variația deformațiilor plastice specifice și variația tensiunilor Von Mises la impactul învelișului în zona coastei C121 ( $x=64.62$  m,  $y=3.19$  m,  $z=5.49$  m), cu  $E=100$  kJ ( $v=10$  m/s),  $T=100$  ms

În variantele a) ale Fig. 5.1 și Fig. 5.3 sunt prezentate diagrame ale deformației plastice specifice în timpul impactului,  $T=100$  ms, pentru cele trei valori ale coeficientului de frecare, Cf, pentru impactul structurii în zona coastelor C121 și C125, cu energia  $E=100$  kJ. Se observă un comportament diferit al structurii funcție de curbura osaturii.

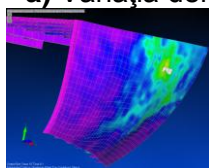
Astfel pentru o curbură mică a coastei C121, situată în vecinătatea zonei cilindrice, valoarea deformației plastice specifice, fiind constantă, ilustrează un impact la care învelișul nu se rupe, pentru toate cele 3 valori ale coeficientului de frecare. Se observă în graficul din varianta a) a Fig. 5.1, o scădere a variației deformației plastice specifice cu 25% pentru cazurile în care s-a considerat influența frecării, la impact, față de cazul în care coeficientul de frecare a fost ignorat.

În variantele b), c) și d) ale Fig. 5.1 este ilustrat comportamentul învelișului la impact, la sfârșitul analizei, pentru cele trei valori ale coeficientului de frecare.

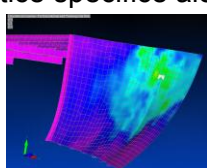
Structura se comportă similar și în zona coastei C123. Impactarea învelișului în zona coastei C125, situată spre prova, datorită curburii acesteia, determină ruperea învelișului, ilustrat prin valoarea nulă a deformației plastice specifice la momentul  $T=40$  ms, fenomen ilustrat în varianta a) a Fig. 5.3 și variantele b),c) și d) ale Fig. 5.3, pentru sfârșitul analizei. Se observă în graficul din varianta a) a Fig. 5.3 scăderea variației deformației plastice specifice cu 10% pentru cazurile în care s-a considerat influența frecării, la impact, față de cazul în care coeficientul de frecare a fost ignorat. În variantele e), f) și g) ale Fig. 5.3 se observă aceeași avarie a zonei impactate pentru toate cele 3 valori ale coeficientului de frecare.



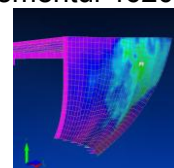
a) Variația deformațiilor plastice specifice ale învelișului, elementul 4620



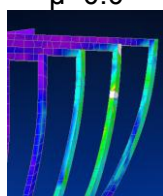
b) Variația tensiunilor Von Mises pentru înveliș,  $\mu=0.0$



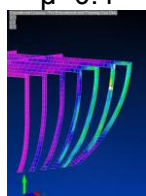
c) Variația tensiunilor Von Mises pentru înveliș,  $\mu=0.4$



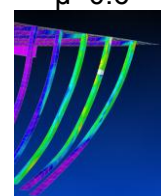
d) Variația tensiunilor Von Mises pentru înveliș,  $\mu=0.6$



e) Variația tensiunilor Von Mises pentru osatură,  $\mu=0.0$



f) Variația tensiunilor Von Mises pentru osatură,  $\mu=0.4$



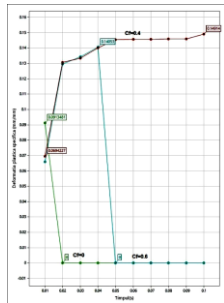
g) Variația tensiunilor Von Mises pentru osatură,  $\mu=0.6$

**Fig. 5.3** Variația deformațiilor plastice specifice și variația tensiunilor Von Mises la impactul învelișului în zona coastei C125 ( $x=66.62$  m,  $y=3.19$  m,  $z=5.29$  m), cu  $E=100$  kJ ( $v=10$  m/s),  $T=100$  ms

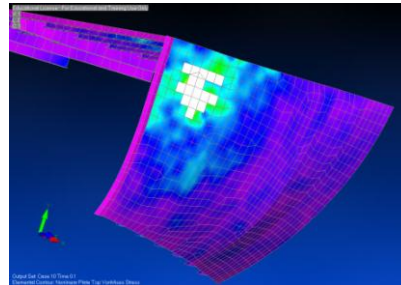
Se observă o creștere a avariei pentru cazul în care se neglijează frecarea, față de cazurile în care se consideră influența frecării. Astfel sunt identificate trei elemente rupte, pentru analizele ce consideră influența coeficientului de frecare, față de două elemente rupte, pentru analiza în care fenomenul frecării a fost ignorat. Aceasta determină o scădere a variației tensiunilor Von Mises cu 6,60% , pentru cazul neglijării frecării față de cazul  $\mu=0.4$ . Similar se identifică o scădere a variației tensiunilor Von Mises cu 14.51%, pentru cazul neglijării frecării, față de cazul  $\mu=0.6$ .

### 5.1.2. Evaluarea efectelor impactului pentru cazul energiei de impact de 400 kJ

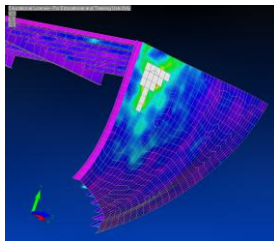
Pentru a studia comparat influența solicitărilor de impact asupra geometriei structurii a fost dublată viteza de impact ceea ce a determinat o creștere a energie de la  $E=100$  kJ la  $E=400$  kJ.



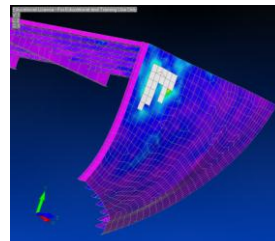
a) Variația deformațiilor plastice specifice ale învelișului, pentru elementul 4807



b) Variația tensiunilor Von Mises pentru înveliș,  $\mu=0.0$



c) Variația tensiunilor Von Mises pentru înveliș,  $\mu=0.4$



d) Variația tensiunilor Von Mises pentru înveliș,  $\mu=0.6$

**Fig. 5.5** Variația deformațiilor plastice specifice și variația tensiunilor Von Mises la impactul învelișului în zona coastei C121 ( $x=64.62$  m,  $y=3.19$  m,  $z= 5.49$  m), cu  $E= 400$  kJ ( $v=20$ m/s),  $T=100$  ms

În variantele a) ale Fig. 5.5 și Fig.5.7 sunt prezentate variații ale deformației plastice specifice în timpul impactului,  $T= 100$  ms, pentru cele trei valori ale coeficientului de frecare,  $C_f$ , pentru impactul structurii în zona coastelor C121 și C125, cu energia  $E= 400$  kJ.

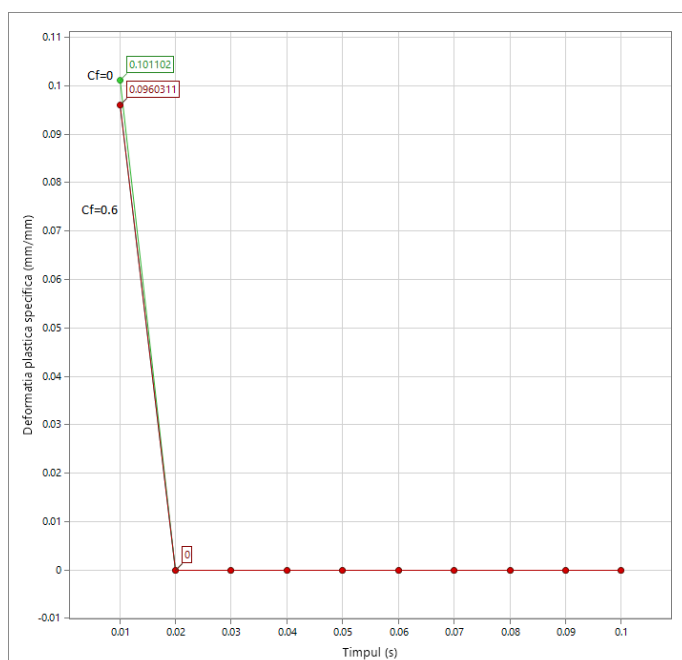
Comportamentul la rupere în zona coastei C121, ilustrat în variantele a) și d) ale Fig. 5.5 arată un comportament diferit al învelișului în punctul de impact. Structura cedază în vecinătatea punctului de impact, la îmbinarea cu coasta C121.

În varianta a) a Fig. 5.7 se observă că mărirea energiei de impact de 4 ori duce la o cedare a învelișului, de două ori mai rapidă, în dreptul coastelor C125.

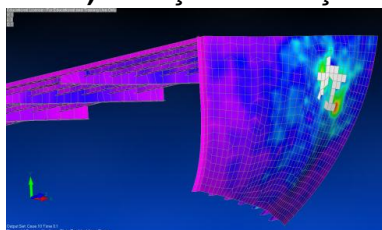
În variantele b), c) și d) ale Fig.5.5 și Fig. 5.7 se observă posibilitatea de rupere a învelișului, cu vizualizarea lungimii și lățimii maxime a avariei învelișului.

Cedarea elementelor de osatură reprezintă o problemă secundară, pentru flotabilitatea barjei, chiar dacă acestea cedază înaintea învelișului.

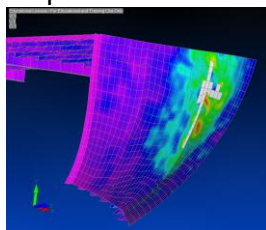
În variantele e), f) și g) ale Fig. 5.7 se observă, influența coeficientului de frecare asupra modului de rupere a osaturii, impactată cu  $E= 400 \text{ kJ}$  ( $v=20 \text{ m/s}$ ), suprafața afectată mai mult fiind cea din varianta e), fără frecare, la care se observă o extindere a efectului și asupra coastei C126 (1 element rupt).



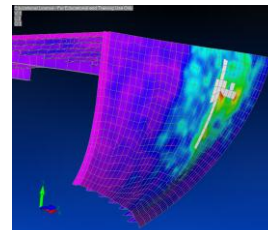
a) Variația deformațiilor plastice specifice ale învelișului, pentru elementul 4620



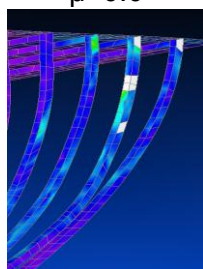
b) Variația tensiunilor Von Mises pentru înveliș,  $\mu=0.0$



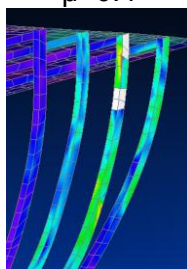
c) Variația tensiunilor Von Mises pentru înveliș,  $\mu=0.4$



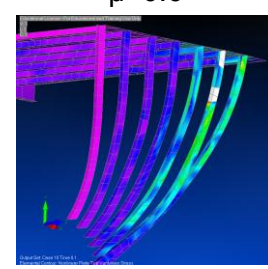
d) Variația tensiunilor Von Mises pentru înveliș,  $\mu=0.6$



e) Variația tensiunilor Von Mises pentru osatură,  $\mu=0.0$



f) Variația tensiunilor Von Mises pentru osatură,  $\mu=0.4$



g) Variația tensiunilor Von Mises pentru osatură,  $\mu=0.6$

**Fig. 5.7** Variația deformațiilor plastice specifice și variația tensiunilor Von Mises la impactul învelișului în zona coastei C125 ( $x=66.62 \text{ m}$ ,  $y=3.19 \text{ m}$ ,  $z= 5.29 \text{ m}$ ), cu  $E= 400 \text{ kJ}$  ( $v=20\text{m/s}$ ),  $T=100 \text{ ms}$

### 5.1.3. Analiza influenței geometriei structurii nemodificate asupra efectelor datorate impactului funcție de coeficienții de frecare dintre elementele structurii și impactor

Pentru observarea comportării în timp a avariilor provocate de impact pentru diferiți coeficienți de frecare a fost necesară analiza variației tensiunilor Von Mises pentru structura

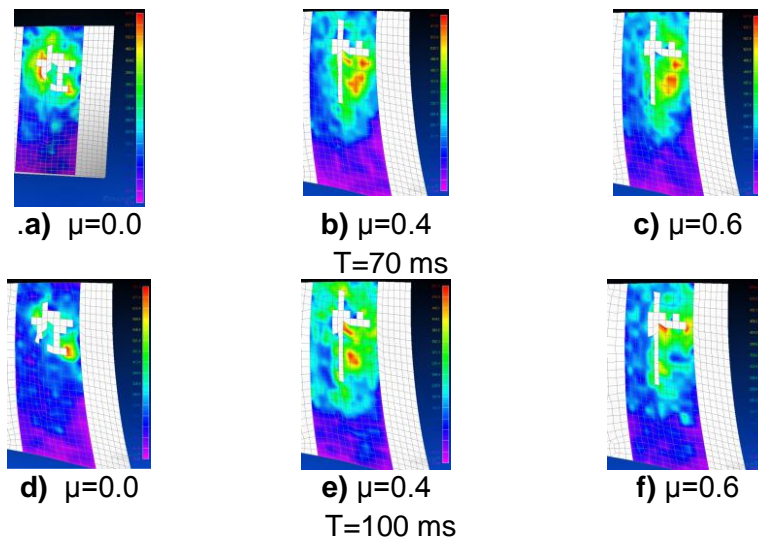
bordajului impactat în zona coastei C125, pentru 2 timpii  $T=70$  ms, respectiv  $T=100$  ms, de la începerea fenomenului de impact. În variantele a), b) și c) ale Fig. 5.8 se poate observa comportarea pe înveliș la momentul  $T=70$  ms. Similar, în variantele e), f) și g) ale Fig. 5.8 se poate observa același comportament pentru  $T=100$  ms. Datele numerice sunt prezentate în Tabelul 5.9.

**Tabelul 5.9** Influența frecării asupra variației tensiunilor Von Mises pe înveliș, în zona coastei C125, la impactul cu energia  $E=400$  kJ (20 m/s)

Timpul (ms)	Tensiunile Von Mises (MPa)		
	$\mu=0.0$	0.4	$\mu=0.6$
70	571	653	641
100	721	507	559

Din analiza comparată a datelor din Tabel 5.9 și a diagramelor din Fig.5.8, ce prezintă valori ale variației tensiunilor Von Mises pe înveliș, se observă o tendință diferită pentru cazul în care se neglijează frecarea față de cel în care se consideră frecarea.

Astfel la finalul analizei, la  $T=100$  ms, se observă o scădere a variației tensiunilor Von Mises cu o valoarea maximă de 29,68%, pentru cazul considerării unui coeficient de frecare egal cu 0.4, față de cazul neglijării frecării. Însă la momentul  $T=70$  ms, tendința se inversează. Astfel se observă, la acest moment, o creștere a variației tensiunilor Von Mises cu o valoarea maximă de 14.36% pentru cazul considerării unui coeficient de frecare egal cu 0.4, față de cazul neglijării frecării. Tendințele de scădere/creștere ale tensiunilor Von Mises sunt similare, pentru ambele momente de timp, dacă se realizează analiza comparată și pentru cazul coeficientului de frecare egal cu 0.6 versus cazul în care frecarea este neglijată.



**Fig. 5.8** Diagramele variației tensiunilor Von Mises pe înveliș, pentru diferiți coeficienți de frecare, la impactul în zona coastei C125 ( $x=66.62$  m,  $y=3.19$  m,  $z=5.29$  m), cu  $E=400$  kJ ( $v=20$  m/s)

Similar este realizată analiza comparată a variației tensiunilor Von Mises pe elementele de osatură, impactate cu energia  $E=400$  kJ (20 m/s).

Astfel la finalul analizei, la  $T=100$  ms, se observă o scădere a variației tensiunilor Von Mises cu o valoarea de 11.71%, pentru cazul considerării unui coeficient de frecare egal cu 0.4, față de cazul neglijării frecării. Tendința se păstrează pentru momentul  $T=70$  ms, scăderea fiind cu o valoare de 7.82% . Tendința de scădere a tensiunilor Von Mises este similară și pentru

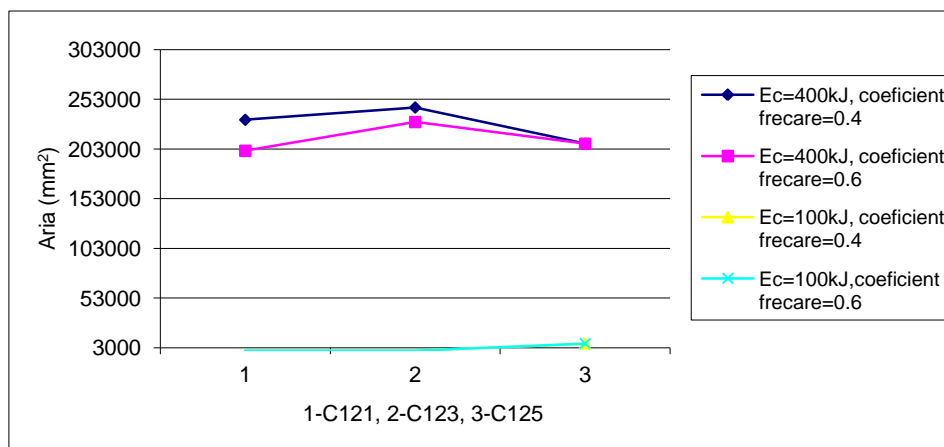


momentul  $T=70$  ms, la analiza comparată pentru cazul coeficientului de frecare egal cu 0.6 versus cazul în care frecarea este neglijată. Pentru valoarea acestui coeficient de frecare, la finalul analizei la  $T=100$  ms, se observă o creștere a variației tensiunilor Von Mises cu o valoare de 1.18% pentru cazul considerării unui coeficient de frecare egal cu 0.6, față de cazul neglijării frecării.

Analizele comparate pentru studiul variației tensiunilor Von Mises pentru structura bordajului impactat în zona coastei C125, pentru 2 timpii  $T=70$  ms, respectiv  $T=100$  ms, de la începerea fenomenului de impact, arată aspectul nelinier și complex al fenomenului de impact.

Din analiza rezultatelor modelărilor numerice se determină influența geometriei asupra ariei și volumului avariat datorat impactului cu cele două energii,  $E=100$  kJ, respectiv  $E=400$  kJ.

Tranziția geometriei de la suprafețe plane la suprafețe curbe, caracteristică trecerii de la zona cilindrică la zona probei, are efect atât asupra ariei avariate cât și asupra volumului distrus.



**Fig. 5.10.** Variația ariei avariate pe înveliș, impactat în zona coastelor C121, C123 și C125 (studiul C)

Se observă în graficul din Fig.5.10 că există o tendință de creștere a efectelor distructive de la coasta C121 spre prova, în zona coastei C125, pentru  $E=100$  kJ. Se observă că această tendință este opusă pentru  $E=400$  kJ, aceste efecte scăzând de la coasta C121 spre prova, pentru  $\mu=0.6$ .

Astfel se identifică, la final, o creștere cu 96.56% pentru volumul și aria avariata, la impactarea învelișului în dreptul coastei C125 cu  $E=400$  kJ față de impactul cu  $E=100$  kJ, considerată la finalul analizei.

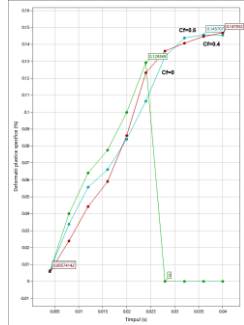
Rezultatele obținute în studiul prezentat anterior a avut rolul de a lămurii, literatura de specialitate în domeniul naval furnizând puține date în acest sens, comportarea la impact a structurilor navale plane și curbe. Acest subiect, studiat în §5.2, permite abordarea de noi geometrii care să conducă la reducerea zonelor avariate, astfel încât integritatea structurii să nu pună în pericol integritatea întregului plutitor.

#### 5.1.4. Studiul apariției ruperii datorate solicitărilor de impact

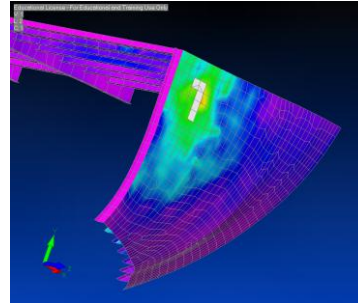
Deoarece încă de la apariție primelor cedări ale învelișului acesta permite intrarea apei în corp sau deversarea de produse toxice pentru mediu, este necesar a se efectua un studiu în primele faze ale procesului de rupere.

În variantele a) ale Fig. 5.15 și Fig. 5.17 sunt prezentate diagrame ale deformației plastice specifice în timpul impactului,  $T=40$  ms, pentru cele trei valori ale coeficientului de frecare,  $C_f$ , pentru impactul structurii în zona coastelor C121 și C125, cu energia  $E=144$  kJ.

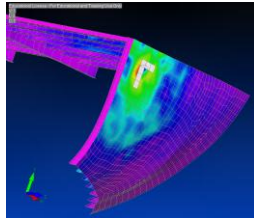
Valoarea zero a acestui parametru marchează ruperea respectivului element. Se observă deformarea plastică a învelișului în zona coastelor C121, ilustrată în varianta a) a Fig.5.15. Creșterea energiei de impact cu 44% determină creșterea ariei avariate pe înveliș cu 202%, pentru cazul în care frecarea este neglijată, și cu 140% pentru  $\mu = 0.4$ . Ruperea învelișului impactat în zona coastei C125, se poate vizualiza, pentru toate valorile lui  $\mu$ , în variantele a), b), c) și d) ale Fig. 5.17.



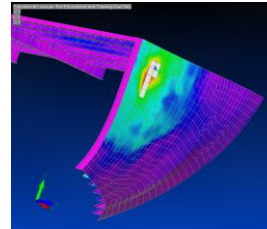
a) Variația deformațiilor plastice specifice ale învelișului, pentru elementul 4807



b) Variația tensiunilor Von Mises pentru înveliș,  $\mu=0.0$

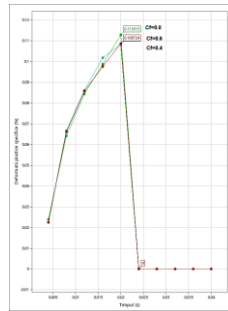


c) Variația tensiunilor Von Mises pentru înveliș,  $\mu=0.4$

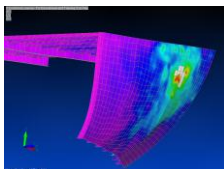


d) Variația tensiunilor Von Mises pentru înveliș,  $\mu=0.6$

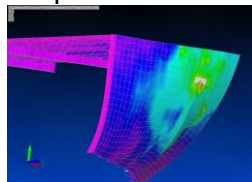
**Fig. 5.15** Variația deformațiilor plastice specifice și variația tensiunilor Von Mises la impactul învelișului în zona coastei C121 ( $x=64.62$  m,  $y=3.19$  m,  $z= 5.49$  m), cu  $E= 144$  kJ ( $v=12$  m/s),  $T=40$  ms



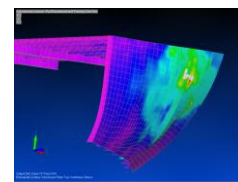
a) Variația deformațiilor plastice specifice ale învelișului, pentru elementul 4620



b) Variația tensiunilor Von Mises pentru înveliș,  $\mu=0.0$



c) Variația tensiunilor Von Mises pentru înveliș,  $\mu=0.4$

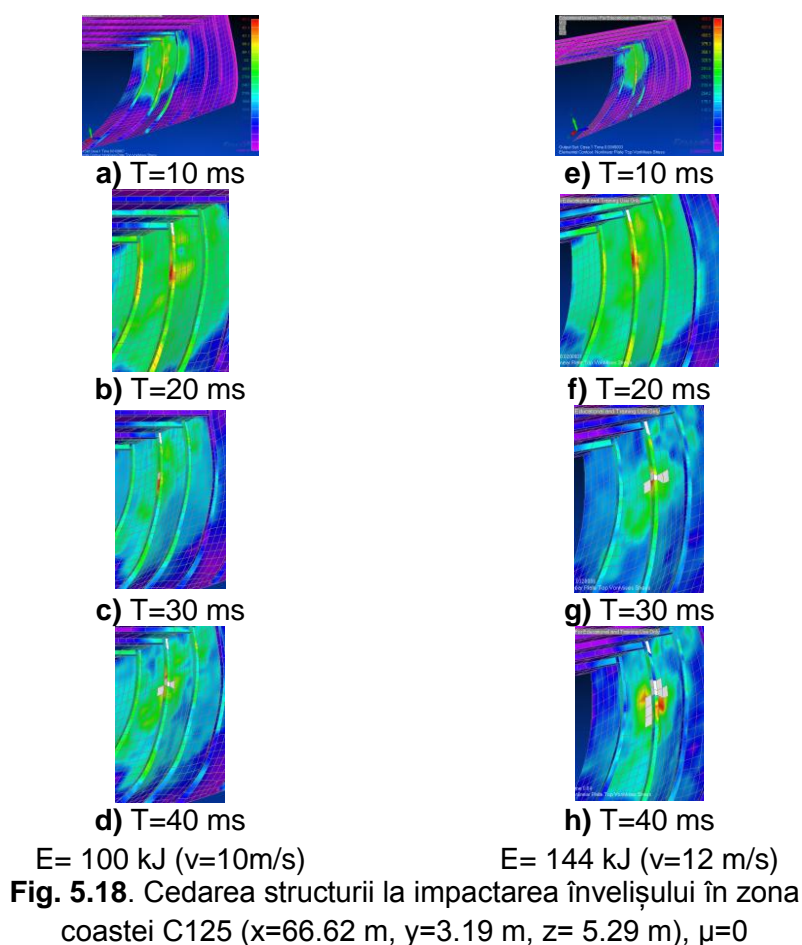


d) Variația tensiunilor Von Mises pentru înveliș,  $\mu=0.6$

**Fig. 5.17** Variația deformațiilor plastice specifice și variația tensiunilor Von Mises la impactul învelișului în zona coastei C125 ( $x=66.62$  m,  $y=3.19$  m,  $z= 5.29$  m), cu  $E= 144$  kJ ( $v=12$  m/s),  $T=40$  ms

Fig.5.18 prezintă procesul de apariție a rupei structurii pentru 4 momente de timp, până la momentul  $T=40$  ms. În variantele a), b), c) și d) ale Fig. 5.18, este ilustrată cedarea structurii impactată în zona coastei C125 cu energia  $E=100$  kJ ( $v=10$ m/s). Similar, în variantele e), f), g) și h) ale Fig. 5.18 se observă același proces pentru impactarea structurii cu  $E=144$  kJ ( $v=12$ m/s).

Se observă că procesul de rupere se intensifică după momentul  $T=20$  ms, încât la momentul  $T=30$  ms, se observă că o creștere cu 44% a energiei de impact determină o creștere a ariei avariate cu 85% , cu cedarea tablei bordajului. Fenomenul este prezentat în variantele c) și g) ale Fig. 5.18. Deoarece între momentul  $T=20$  ms și  $T=30$  ms există 10000 de pași ai analizei care nu au fost ilustrați, este posibilă identificarea momentului la care ruperea structurii să fie similară, pentru cele două valori ale energiei, la timpi diferiți. Cunoscând mărimea avariilor provocate în cazul impactului a două structuri navale, avarii care pot conduce la pierderea flotabilității sau/și poluarea mediului, se pot da norme referitoare la viteza de navigație pentru fiecare tip de navă astfel încât posibilele accidente să nu fie cu urmări majore.



Pentru a studia influența geometriei asupra rupei au fost realizate 18 scenarii de coliziune, iar analizând comparat, variația tensiunilor Von Mises pentru impactarea structurii cu cele două valori ale energiilor, atât în cazul existenței frecării cu o valoare de 0.4, cât și în absența frecării, se observă că o creștere cu 44% energiei de impact determină o creștere a variațiilor tensiunilor Von Mises, la momentul  $T=40$  ms, cu 32.05% pentru cazul neglijării frecării, și cu 38.64%, pentru un impact cu un coeficient de frecare între barjă și impactor egal cu 0.4.

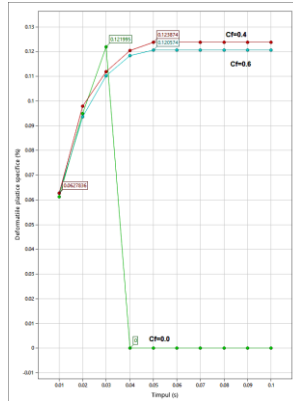
## 5. 2. Soluții de proiectare pentru diminuarea efectelor coliziunii

Pentru diminuarea efectelor coliziunii asupra structurii navale se folosesc observațiile paragrafului 5.1, fiind propuse două opțiuni de proiectare prin care se aduc modificari

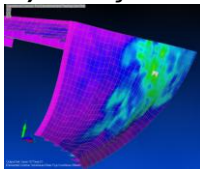
caracteristicilor geometrice și curburii structurii navale ce se vor prezenta în §5.2.1, respectiv în §5.2.2.

### 5.2.1 Reproiectarea caracteristicilor geometrice ale structurii (modificarea grosimii tablei învelișului și a elementelor de osatură)

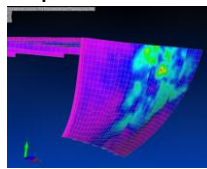
Se alege ca soluție, modificarea grosimii tablei, în zona coastei C125, conform variantelor prezentate în Tabelul 4.10 din capitolul 4 (vezi §4.3).



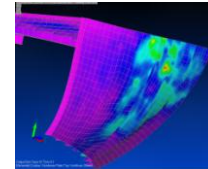
a) Variația deformațiilor plastice specifice ale învelișului, pentru elementul 4620



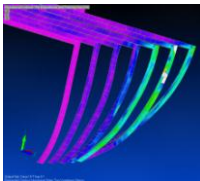
b) Variația tensiunilor Von Mises pentru înveliș,  $\mu=0.0$



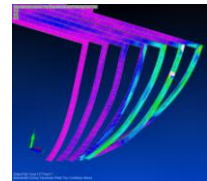
c) Variația tensiunilor Von Mises pentru înveliș,  $\mu=0.4$



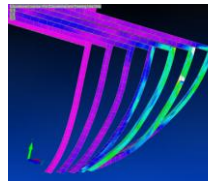
d) Variația tensiunilor Von Mises pentru înveliș,  $\mu=0.6$



e) Variația tensiunilor Von Mises pentru osatură,  $\mu=0.0$



f) Variația tensiunilor Von Mises pentru osatură,  $\mu=0.4$



g) Variația tensiunilor Von Mises pentru osatură,  $\mu=0.6$

**Fig. 5.21** Variația deformațiilor plastice specifice și variația tensiunilor Von Mises la impactul învelișului reproiectat în zona coastei C125 ( $x=66.62$  m,  $y=3.19$  m,  $z=5.29$  m), cu  $E=100$  kJ ( $v=10$  m/s),  $T=100$  ms (Varianta II)

Diagramele din Fig. 5.21 și Fig. 5.22 ilustrează comportamentul structurii bordajului impactat în zona coastei C125 cu energiile  $E=100$  kJ (10 m/s) și  $E=400$  kJ (20 m/s), pentru trei valori ale coeficientului de frecare.

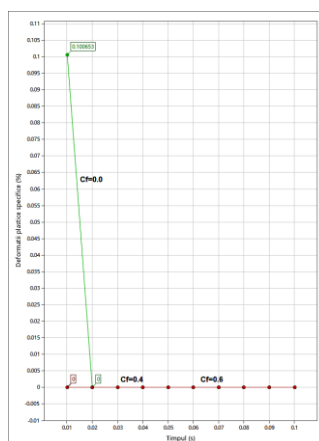
În varianta a) a Fig. 5.21 este prezentată diagrama deformației plastice specifice în timpul impactului,  $T=100$  ms, pentru cele trei valori ale coeficientului de frecare,  $C_f$ , pentru impactul structurii în zona coastei C125, cu energia  $E=100$  kJ. Valoarea zero a acestui parametru marchează ruperea respectivului element.

Se observă, din variantele b), c) și d) ale Fig. 5.21, variația tensiunilor Von Mises pe învelișul impactat în zona coastei C125, pentru varianta II de reproiectare. Astfel aria avariata a învelișului reproiectat, prin creșterea grosimii tablei (varianta II), scade cu 75 % față de valorile similare ale structurii nemodificate, pentru  $\mu=0.0$ . În varianta de reproiectare a osaturii, prin

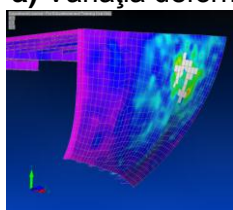
creșterea grosimii tablei (variantele I), aria avariată este identică cu cea inițială. În variantele e), f) și g) ale Fig. 5.21 sunt prezentate variațiile tensiunilor Von Mises pe osatura impactată în zona coastei C125, pentru varianta II de reproiectare. Nu se constată deosebiri majore privind ariile avariate pe osatură.

În varianta a) a Fig.5.22 este prezentată variația deformațiilor plastice specifice pentru impactul structurii în zona coastei C125, cu energia  $E=400$  kJ ( $v=20$  m/s). Se observă ruperea structurii în zona de impact, cedând atât osatura cât și învelișul bordajului.

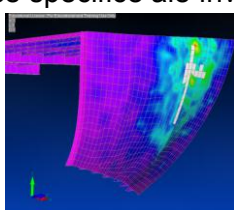
În variantele b), c), d), e) și f) ale Fig..22 se observă comportamentul la impact al structurii reproiectate (variantele I), funcție de cele trei valori ale coeficientului de frecare. Se observă o scădere a ariei avariate pe osatură cu 29.65% a variantei I, în care s-a modificat grosimea tablei osaturii, față de structura nemodificată, pentru  $\mu=0.6$ .



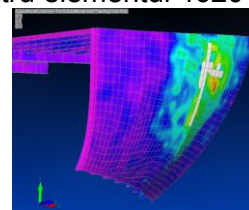
**a)** Variația deformațiilor plastice specifice ale învelișului, pentru elementul 4620



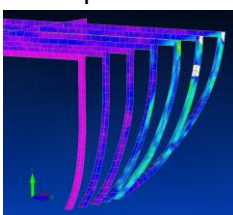
**b)** Variația tensiunilor Von Mises pentru înveliș,  $\mu=0.0$



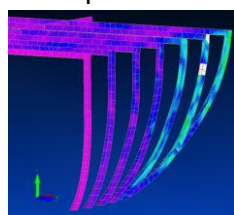
**c)** Variația tensiunilor Von Mises pentru înveliș,  $\mu=0.4$



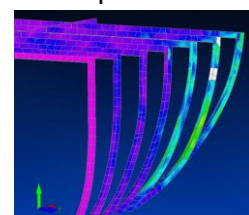
**d)** Variația tensiunilor Von Mises pentru înveliș,  $\mu=0.6$



**e)** Variația tensiunilor Von Mises pentru osatură,  $\mu=0.0$



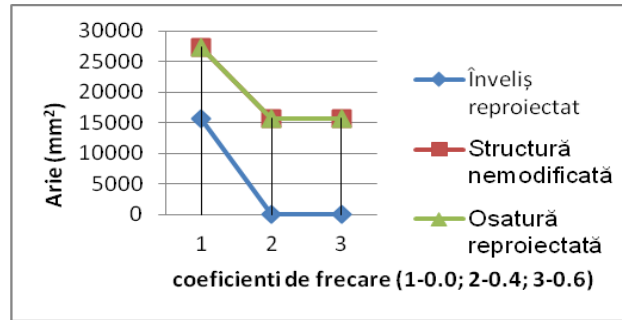
**f)** Variația tensiunilor Von Mises pentru osatură,  $\mu=0.4$



**g)** Variația tensiunilor Von Mises pentru osatură,  $\mu=0.6$

**Fig. 5.22** Variația deformațiilor plastice specifice și variația tensiunilor Von Mises la impactul învelișului în zona coastei C125 reproiectate ( $x=66.62$  m,  $y=3.19$  m,  $z=5.29$  m), cu  $E=400$  kJ ( $v=20$  m/s),  $T=100$  ms (Varianta I)

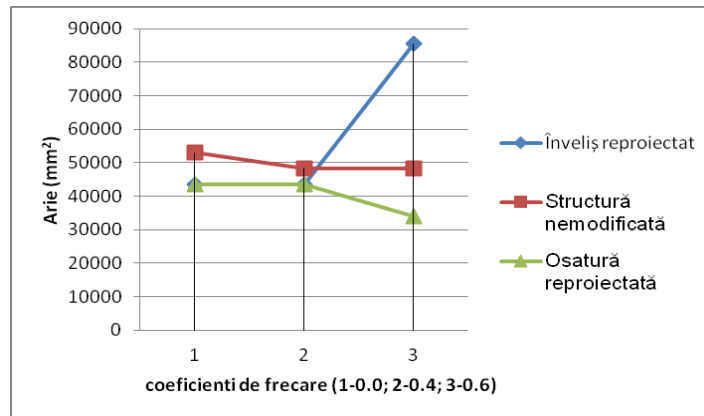
Pentru a studia influența noii geometrii asupra ruperii au fost realizate 12 scenarii de coliziune. În Fig.5.24 este prezentată analiza comparată a variației ariilor avariate funcție de coeficienții de frecare, pentru structurile reproiectate și cea nemodificată, la impactarea cu  $E=100$  kJ ( $v=10$  m/s).



**Fig. 5.24** Variația ariilor avariate pe înveliș, funcție de coeficienții de frecare, pentru structurile reproiectate și cea nemodificată, la impactarea cu  $E=100$  kJ ( $v=10$  m/s)

Se observă lipsa avariei pe înveliș pentru varianta II, pentru  $\mu=0.4$  și  $\mu=0.6$ , la care s-a modificat grosimea tablei bordajului.

Din graficul prezentat în Fig.5.25 se observă un comportament mai bun al osaturii față de geometria inițială, pentru varianta de reproiectare a coastei C125 (varianta I), pentru  $\mu=0.6$ , ce determină scăderea cu 29.65% și 1.67% a ariei, respectiv volumului zonei avariate, impactată cu  $E=400$  kJ ( $v=20$  m/s).



**Fig. 5.25** Variația ariilor avariate pe osatură, funcție de coeficienții de frecare, pentru structurile reproiectate și cea nemodificată, la impactarea cu  $E=400$  kJ ( $v=20$  m/s)

### 5.2.2.2. Reproiectarea curburii osaturii

A fost modificată osatura la C125 prin deplasarea a 6 puncte (Varianta III), spre interiorul navei după direcția Z, simetric în ambele borduri. Poziția inițială a punctelor este prezentată în Tabelul 5.21 iar deplasarea acestora, după transformare, este menționată în Tabelul 5.22.

**Tabelul 5.21** Poziția inițială a punctelor supuse modificării, la C125, în bordul tribord

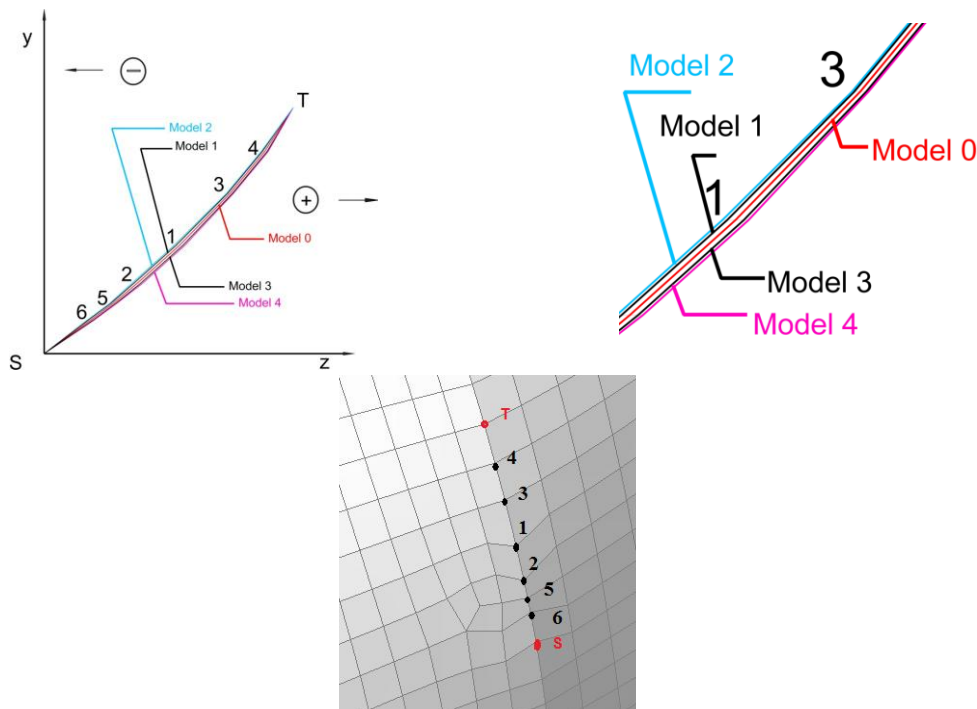
Poziție conform Fig. 5.26	Coordonate (mm)			Nod (Tb.)
	X	Y	Z	
6	66625	1796	4409	3641
1	66625	1951	4593	3639
3	66625	2060	4698	3638
4	66625	2146	4769	3637

5	66625	1830	4454	5981
2	66625	1871	4503	3640
S	66625	1726	4311	3642
T	66625	2237	4828	3636

**Tabelul 5.22** Modificarea curburii osaturii după axa Z, la C125 ( $x=66.62$  m,  $y=3.19$  m,  $z= 5.29$  m), în bordul tribord (Varianta III)

Geometrie	Distanța (mm)					
	1	2	3	4	5	6
Model 1	-7	-7	-5	-5	-5	-5
Model 2	-11	-11	-7	-7	-7	-7
Model 3	7	7	5	5	5	5
Model 4	11	11	7	7	7	7

Poziționarea punctelor pe bordul tribord, la coasta C125 este arătată pe curbele și pe elementele mesh-ului ilustrat în Fig. 5.26, nodurile S și T fiind fixe. Modificările realizate nu afectează suprafața învelișului, acesta având, la final, o singură curbă.

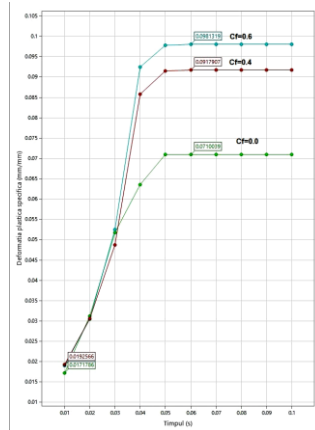


**Fig. 5.26** Modificarea curburii coastei C125 de la forma inițială a modelului, M0, la noile curburi ale modelelor M1, M2, M3 și M4

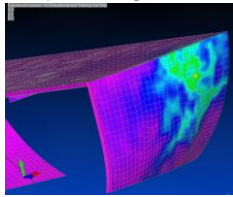
Pentru noile geometrii obținute a fost evaluată calitatea elementelor mesh [67]. Valoarea Jacobian obținută este 0.6 pentru cele patru modele, fiind foarte apropiată de valoarea Jacobian a geometriei inițiale ( $J=0.597$ ).

Opțiunea Free Edges din meniul MeshToolbox a permis evaluarea contactului în zona modificării structurii. Vizualizările efectuate au arătat că nu au apărut desprinderi în urma transformărilor realizate. Pentru a studia comportamentul noilor geometrii la impact, au fost realizate alte 24 scenarii de coliziune (6 pentru fiecare model).

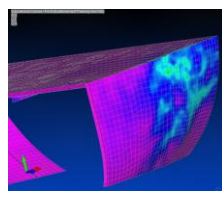
Din datele analizelor numerice pentru modelul 1 și 2 au rezultat date similare.



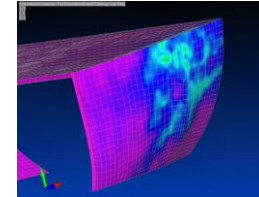
a) Variația deformațiilor plastice specifice ale învelișului, pentru elementul 4620



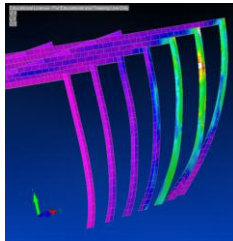
b) Variația tensiunilor Von Mises pentru înveliș,  $\mu=0.0$



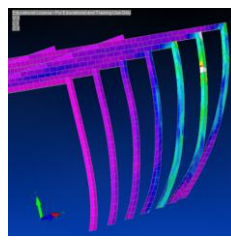
c) Variația tensiunilor Von Mises pentru înveliș,  $\mu=0.4$



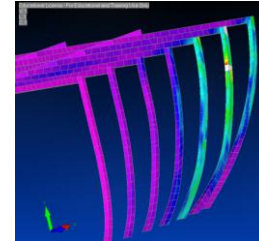
d) Variația tensiunilor Von Mises pentru înveliș,  $\mu=0.6$



e) Variația tensiunilor Von Mises pentru osatură,  $\mu=0.0$



f) Variația tensiunilor Von Mises pentru osatură,  $\mu=0.4$



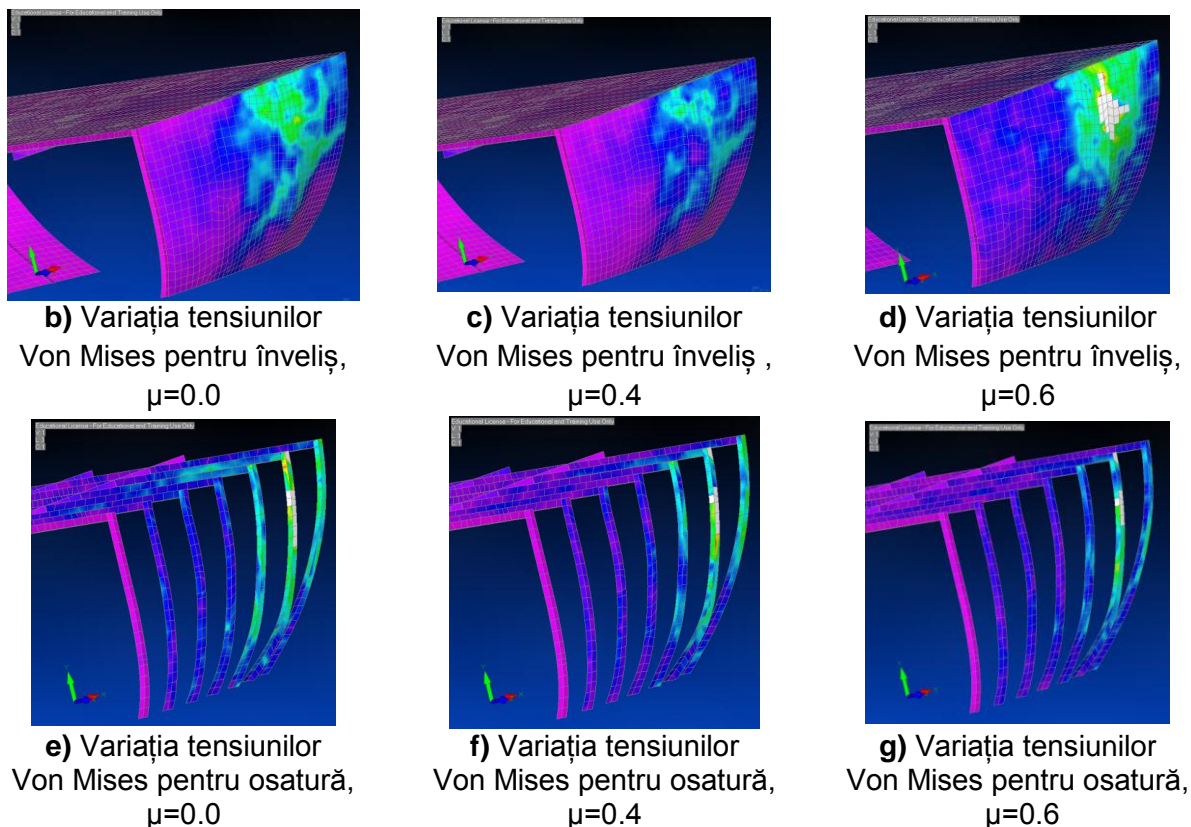
g) Variația tensiunilor Von Mises pentru osatură,  $\mu=0.6$

**Fig. 5.30** Variația deformațiilor plastice specifice și variația tensiunilor Von Mises la impactul învelișului cu curbură reproiectată în zona coastei C125 ( $x=66.62$  m,  $y=3.19$  m,  $z= 5.29$  m), cu  $E= 100$  kJ ( $v=10$  m/s),  $T=100$  ms (Varianta III, model 3)

În varianta a) a Fig. 5.30 este prezentată diagrama deformației plastice specifice la finalul impactului,  $T= 100$  ms, pentru cele trei valori ale coeficientului de frecare,  $C_f$ , pentru impactul structurii în zona coastei C125, cu energia  $E= 100$  kJ, pentru modelele 3. Se observă o creștere a deformației plastice specifice cu o valoare de 21,97% pentru cazul în care se consideră influența frecării cu  $\mu=0.$ , față de cazul în care se neglijează frecarea. Contactul dintre elementele ansamblului barjă-impactor, evidențiat prin coeficienții de frecare, determină o creștere a variației deformației plastice specifice cu 0.06, a coeficientului de frecare  $\mu=0.6$  față de  $\mu=0.4$ . În urma impactului învelișul rămâne deformat în domeniul plastic fără a intra în stadiul de rupere. Acest efect se observă și în variantele b), c) și d) ale Fig. 5.30, unde este prezentată variația tensiunilor Von Mises pe învelișul impactat în zona coastei C125, pentru modelul 3 de reproiectare.

În variantele e), f), g) și h) ale Fig. 5.30 este prezentată variația tensiunilor Von Mises pe osatura impactată cu aceeași energie. Se constată o scădere a variației ariilor avariate cu o valoare de 26.79%, pentru cazul modificării curburii conform model 3 (vezi Fig. 5.26) față de structura nemodificată, doar pentru  $\mu=0.0$ . Nu apar modificări ale avariei osaturii reproiectate față de structura nemodificată, pentru cazurile în care se consideră influența frecării.





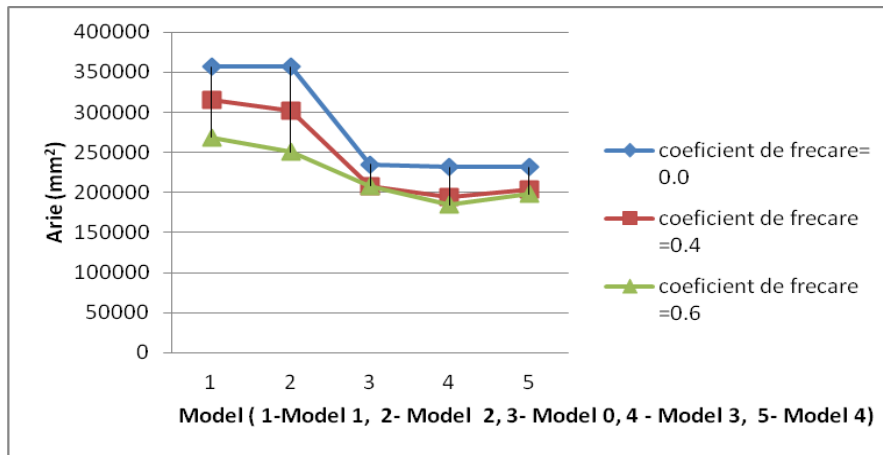
**Fig. 5.34** Variația deformațiilor plastice specifice și variația tensiunilor Von Mises la impactul învelișului cu curbura reprojectată în zona coastei C125 ( $x=66.62$  m,  $y=3.19$  m,  $z= 5.29$  m), cu  $E= 400$  kJ ( $v=20$  m/s),  $T=100$  ms (Varianta III, model 3)

### 5.2.3. Evaluarea influenței curburii osaturii asupra efectelor datorate impactului

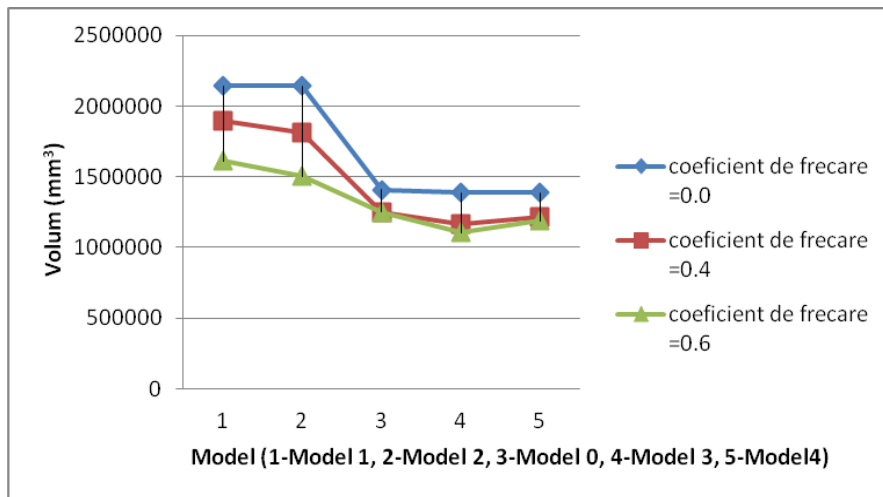
Din analiza datelor se determină influența curburii osaturii asupra ariei și volumului avariat datorat impactului cu energia  $E=100$  kJ ( $v=10$  m/s), pentru patru modele. Se observă că atât ariile cât și volumele avariate au aceleași tendințe de creștere sau de scădere față de valorile similare ale geometriei inițiale, procentual având valori identice pentru toate modele noi. Se identifică o scădere cu 42.84% a ariei avariate pe înveliș numai pentru  $\mu=0$  față de geometria inițială, în timp ce aria avariata pe osatură este neschimbată, pentru primele două modele noi. Pentru celelalte valori ale coeficientului de frecare nu se constată modificări. Pentru modelul 3 și modelul 4 se observă o scădere cu 26,79% a ariei avariate pe osatură numai pentru  $\mu=0$ . La aceste modele, pe înveliș, avaria este nulă. Se observă că modificarea curburii osaturii la modelul 2 față de modelul 1 nu a generat modificări ale efectelor datorate impactului, atât pentru înveliș cât și pentru osatură.

Similar se determină influența curburii bordajului asupra ariei și volumului avariat, datorat impactului cu energia  $E=400$  kJ, pentru cele patru modele.

Au fost comparate ariile și volumele avariate ale celor patru structuri modificate cu valorile similare ale geometriei nemodificate. Se observă o tendință de creștere a variației avariei pe înveliș cu o valoare de maximă de 52%, pentru  $\mu=0.6$ , pentru modelele 1 și 2 față de geometria inițială, așa cum se poate observa în graficul din Fig.5.36. Pentru modelele 3 și 4 se observă o tendință de scădere a variației avariei pe înveliș, cu o valoare maximă de 11.54 %, pentru modelul 3 față de geometria inițială, pentru la  $\mu=0.6$ .



**Fig. 5.36** Influența coeficientului de frecare asupra ariei avariate pe înveliș pentru cele patru modele impactate în zona coastei C125 cu  $E=400$  kJ ( $v=20$ m/s)



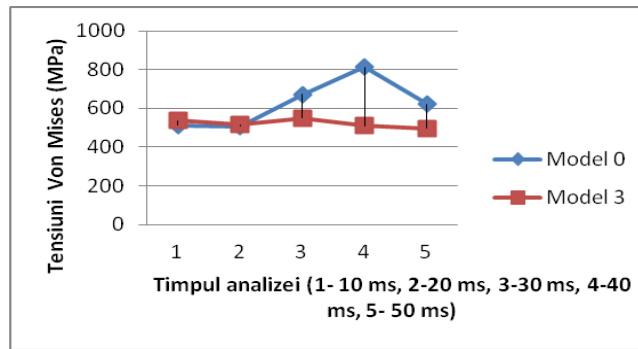
**Fig. 5.37** Influența coeficientului de frecare asupra volumului avariats pe înveliș pentru cele patru modele impactate în zona coastei C125 cu  $E=400$  kJ ( $v=20$ m/s)

În Fig. 5.37 sunt prezentate variațiile volumului avariats al învelișului impactat în zona coastei C125 cu aceeași energie funcție de coeficientul de frecare. Se observă o tendință similară cu cea a variației ariilor avariate, prezentată în Fig.5.36.

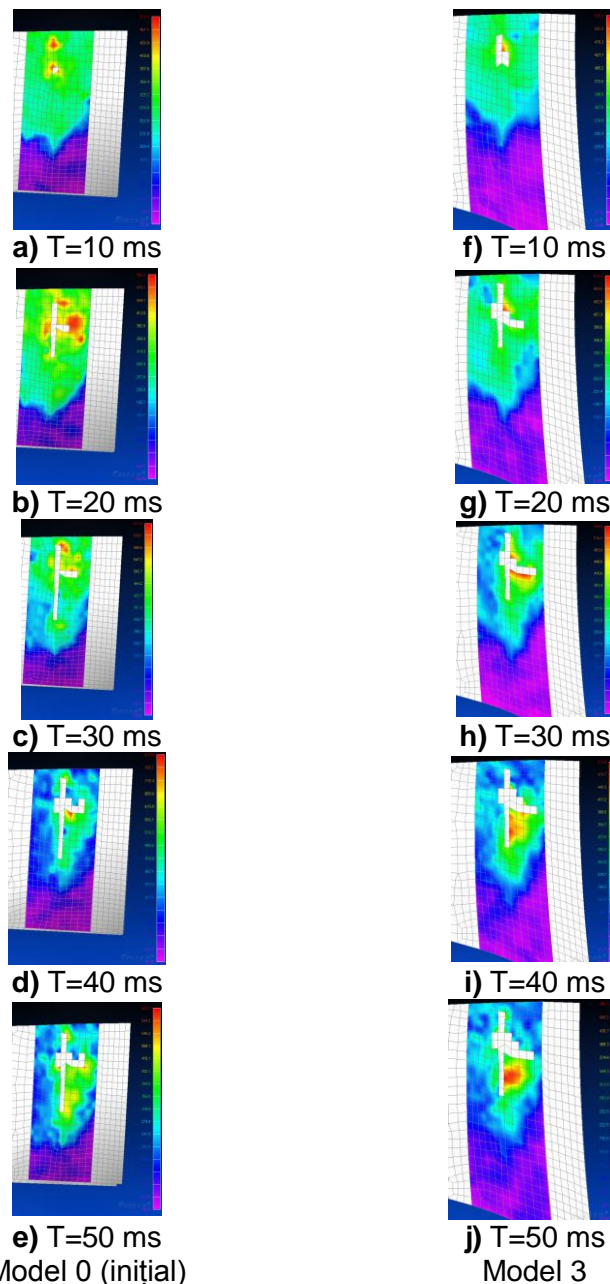
Scăderea variației avariei pe osatură este înregistrată doar pentru modelul 3, având valoarea 2.87, pentru  $\mu=0.6$ .

Este cunoscut faptul că siguranța în navigație a navelor este dată de integritatea învelișului acestora. Astfel s-a considerat necesar a se analiza variația tensiunilor Von Mises pentru învelișul modelului 3 (vezi Fig.5.26), impactat cu  $E = 400$  kJ ( $v=20$  m/s), în zona coastei C125. S-a studiat procesul de apariție a ruperii pentru 5 momente de timp, până la momentul  $T=50$  ms de la începutul coliziunii. Datele numerice rezultate din analiza modelului 3 sunt comparate cu date similare pentru geometria inițială, nemodificată.

În Fig.5.38 și Fig.5.39 este prezentată variația tensiunilor Von Mises pentru învelișul impactat, cu energia  $E=400$  KJ ( $v=20$  m/s), pentru  $\mu=0.4$ , în zona coastei C125. Comportamentul structurii modelului 0 (inițial), este ilustrat în variantele a), b), c), d) și e) ale Fig.5.39, iar în variantele f), g), h) i) și j) ale Fig.5.39 se observă acest lucru pentru modelul 3. Se identifică, din graficul din Fig.5.38, că până la momentul  $T=20$  ms, tensiunile Von Mises ale celor două modele înregistrează diferențe reduse între ele (4,5%).



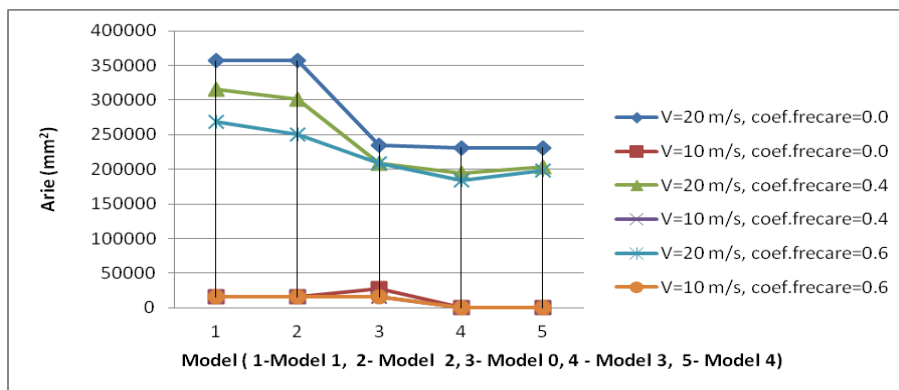
**Fig. 5.38.** Variația tensiunilor Von Mises pentru învelișul impactat în zona coastei C125, cu  $E=400$  kJ ( $v=20$  ms),  $\mu=0.4$ , pentru modelul 0 (inițial) și modelul 3



**Fig. 5.39** Diagrama variației tensiunilor Von Mises pe învelișul impactat în zona coastei C125 ( $x=66.62$  m,  $y=3.19$  m,  $z= 5.29$  m),  $\mu=0.4$

La momentul  $T=40$  ms se identifică scăderea maximă a variației tensiunilor Von Mises cu o valoare de 37.22%, a modelului 3 față de modelul 0 (inițial). Se poate astfel justifica reducerea avariei care apare la finalul analizei, pe înveliș, cu 11.54%, reducere datorată modificării geometriei conform Fig. 5.26. Având în vedere că rezultatele obținute pentru modelul 4 nu respectă aceeași tendință a avariilor pentru structura impactată se poate concluziona că modificarea curburii se realizează doar local, în vecinătatea geometriei inițiale.

În graficul din Fig. 5.40, se observă clar dependența variației avariei geometriei structurii față de viteza de impact. Astfel, la impactarea structurii bordajului cu viteza  $v=10$  m/s nu se constată modificări vizibile ale avariei pentru cele 4 modele reproiectate, conform Fig.26, față de structura inițială, nemodificată. La impactarea structurii cu  $v=20$  m/s se observă un comportament variat al modelelor reproiectate față de structura nemodificată. Astfel, din graficul din Fig.5.40 se poate identifica rapid, că modelul 3 este cel care prezintă cel mai bun comportament la impact, din cele propuse.



**Fig. 5.40** Influența geometriei asupra ariei avariate pe înveliș pentru cele patru modele impactate la C125, funcție de cele trei valori ale coeficienților de frecare

### 5.3. Concluzii

Din studiul celor 72 de analize structurale, prezentate în acest capitol, influențate de viteza de impact și coeficientul de frecare, au rezultat următoarele concluzii:

1. În toate variantele de solicitare la impactul lateral al învelișului structurii navale efectele sunt locale, osatura cedând mai repede decât tabla învelișului, ceea ce asigură flotabilitatea navei pentru o perioadă de timp.
2. Creșterea energiei de impact de 4 ori determină scăderea la jumătate a timpului de cedare a tablei bordajului.
3. Creșterea cu 96.56% a volumului și ariei zonei avariate la impactarea învelișului în dreptul coastei C125 pentru impactul cu  $v=20$  m/s ( $E=400$  kJ) față de impactul cu  $v=10$  m/s ( $E=100$  kJ).
4. Creșterea grosimii tablelor învelișului cu 16.6% determină creșterea masei structurii cu 5.42 % și întărirea învelișului, astfel că la solicitarea la impact cu  $v=10$  m/s ( $E=100$  kJ) acesta nu cedează, spre deosebire de geometria inițială la care învelișul este rupt (varianta II).
5. Creșterea grosimii tablelor osaturii 16.6% determină creșterea masei structurii cu 2.3% și scăderea cu 29.65% a ariei și 1.67% a volumului osaturii avariate pentru solicitarea la impact a structurii cu  $v=20$  m/s ( $E=400$  kJ), pentru  $\mu=0.4$ , față de valori similare ale geometriei inițiale (varianta I).

6. Modificarea curburii bordajului determină scăderea variației ariei avariate față de geometria inițială, cu 11.54% pentru înveliș, și 2.87% pentru osatură, în cazul modelului 3, la  $\mu=0.6$ , impactul fiind realizat cu energia  $E=400$  kJ ( $v=20$  m/s) (varianta III).
7. Modificarea curburii osaturii determină, la dublarea vitezei de impact, o scădere a variației ariei avariate a osaturii cu 2.87 % a pentru modelul 3, față de valorile inițiale (varianta III).

În analizele numerice realizate în acest capitol s-a observat că modificările caracteristicilor geometrice ale structurii influențează direct proporțional lungimea zonei avariate, la impactul cu energia  $v=10$  m/s ( $E=100$  kJ) ce determină atingerea stadiului plastic, spre deosebire de impactul cu energia cu  $v=20$  m/s ( $E=400$  kJ), ce determină atingerea stadiului de rupere, la care valoarea suprafeței avariate devine dependentă de curbura osaturii,, modelul 3 al variatei III de reproiectare demonstrând un comportament mai bun la impact față de geometria inițială.



## CAPITOLUL 6

### CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII PERSONALE. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

#### 6.1 Concluzii finale

Structurile navale, în particular barjele proiectate la ICEPRONAV- Galați până în anul 1989 răspund recomandărilor regulilor elaborate de Registrul Naval Român, de rezistență în domeniul elastic. Deoarece traficul pe Dunăre din ultimii ani a crescut iar multe din navele românești sunt uzate, devine necesară analiza structurii acestora în domeniul plastic pentru mărirea gradului de siguranță a navei și evitarea riscului de poluarea a mediului în apele interioare. În domeniul naval fenomenul de impact este reglementat prin normele incluse în DNV GL-RP- 204 emis în anul 2017, prin care se standardizează proiectarea ce asigură securitatea funcționării navelor, în cazul solicitărilor accidentale ale structurii lor.

Analiza numerică prin Metoda Elementelor Finite este eficientă pentru studierea comportamentului structurilor navale la impact, pentru aceasta luându-se în considerare reglementările din DNV-GL-RP-C208. Normele se referă, în principal, la modul de analiză folosind MEF pentru discretizarea structurii în elemente finite, aplicarea condițiilor la limită, comportamentul materialului ne-linear și criteriile de cedare.

Determinarea metodologiei de calcul pentru studierea comportării structurii zonei prova, pentru barja 2000T, a fost realizată pe bază de teste experimentale. În urma impactării a două modele cu o masă sferică din oțel, s-a constatat deformarea elasto - plastică a acestora. Cele două modele folosite sunt:

- experiment 1 – suprafață metalică având o curbura de rază  $R=213.75$  mm, din oțel S235
- experiment 2 – suprafață metalică având o curbura de rază  $R=226.59$  mm, din oțel S235

Au fost determinate deplasarea modelului (în direcția de aplicare a forței) și forța de contact dintre masa de oțel și suprafața din tablă a modelului. Analiza comparativă între rezultatele experimentale și cele ale simulărilor numerice corespunzătoare este ilustrată, procentual, în Tabelul 6.1:

**Tabelul 6.1** Centralizator comparativ  
experiment- simulări numerice

Nr.	Experiment	Diferențe (%)		
		Deplasări (simulare vs. experiment)	Deplasări (curbura 2 vs. curbura 1)	
			Experimental	Simulare
1	Experiment 1	- 4.39	-	
2	Experiment 2	8.05	-15.76	- 4.80

Diferența maximă pentru deplasarea nodului în zona impactată, între experimente și simulările numerice are valoarea 8.05%, valoare inclusă în marja de siguranță utilizată în domeniul structurilor navale (5-10%). Se observă că, modelul din experimentul 2 caracterizat printr-o curbura mai mică, determină atât experimental cât și numeric, scăderea efectelor în zona de impact.

Metoda de analiză numerică propusă pentru modelul de materialul necesar studierii structurii, și verificată pe baza testelor experimentale este utilizată preliminar pentru analiza comportării la impactul punții principale a probei barjei 2000 T și apoi la impactul lateral al bordajului al aceleiași structuri.

Modelul numeric al structurii navale utilizat la analiza comparativă este construit conform normelor DNV-GL-RP-C208 și DNVGL-CG-0127.

Din analiza datelor obținute în urma simulării numerice a impactului structurii navale, au rezultat următoarele:

- se poate determina atingerea stadiului plastic de deformare la solicitarea structurii la impact prin analiza deformației plastice specifice (vezi §3.2);
- este recomandată considerarea coeficientului de frecare pentru evidențierea realistă a cedării structurii (vezi §3.3 și §4.1);
- se pot identifica variante de proiectarea a caracteristicilor geometrice ale structurii pentru diminuarea tensiunilor datorate solicitării de impact prin analiza comportării locale a elementelor de structură, pentru atingerea stadiului plastic (vezi §4.2. și §4.3);
- se poate determina atingerea stadiului plastic de rupere la solicitarea structurii la impact prin analiza deformației plastice specifice (vezi §5.1);
- se pot identifica variante de proiectarea a caracteristicilor geometrice ale structurii și modificarea curburii osaturii pentru diminuarea tensiunilor datorate solicitării de impact prin analiza comportării locale a elementelor de structură, pentru atingerea stadiului de rupere (vezi §5.2)

După analiza modului de deformare și cedare a structurii osaturii și învelișului, la impact, s-au identificat următoarele variante de investigare:

- dimensionarea osaturii în zona afectată pentru preluarea tensiunilor (varianta I) la impactul cu energia  $E=100\text{kJ}$  ( $v=10\text{m/s}$ ) (varianta I,  $E=100\text{ kJ}, v=10\text{ m/s}$ );
- dimensionarea învelișui în zona afectată pentru preluarea tensiunilor (varianta II) la impactul cu energia  $E=100\text{ kJ}$  ( $v=10\text{ m/s}$ ) (varianta II,  $E=100\text{ kJ}, v=10\text{ m/s}$ );
- dimensionarea osaturii în zona afectată pentru diminuarea efectelor impactului (varianta I) la impactul cu energia  $E=400\text{ kJ}$  ( $v=20\text{ m/s}$ ) (varianta I,  $E=400\text{ kJ}, v=20\text{ m/s}$ );
- dimensionarea învelișui în zona afectată pentru diminuarea efectelor impactului (varianta II) la impactul cu energia  $E=100\text{ kJ}$  ( $v=10\text{ m/s}$ ) (varianta II,  $E=400\text{ kJ}, v=20\text{ m/s}$ );
- modificarea curburii osaturii pentru diminuarea efectelor impactului (varianta III) la impactul cu energiile  $E=100\text{ kJ}$  ( $v=10\text{ m/s}$ ) și  $E=400\text{ kJ}$  ( $v=20\text{ m/s}$ ) (varianta III,  $E=100\text{ kJ}, v=10\text{ m/s}$  și  $E=400\text{ kJ}, v=20\text{ m/s}$ ).

După analiza variantelor de modificare a geometriei structurii descrise mai sus, se poate concluziona:

- o metodă de diminuare a dimensiunilor zonei avariate a învelișului, în zona cu curbura mai mare, este creșterea grosimii tablelor învelișului pentru variantele în care energiile de impact au generat pentru structură, atât atingerea stadiului plastic cât și atingerea rupei;



- o metodă de diminuare a zonei avariate este creșterea grosimii tablelor osaturii pentru variantele în care energiile de impact au generat atingerea stadiului de rupere;

Având în vedere cele două obiective principale stabilite: diminuarea tensiunilor din structură și diminuarea zonei avariate în urma impactului s-a observat că noile structuri au îndeplinit obiectivele propuse astfel:

- diminuarea tensiunilor Von Mises de 3.47% ale osaturii față de valorile similare ale geometriei inițiale, pentru varianta în care energiile au generat atingerea stadiului plastic, pentru varianta de dimensionare a caracteristicilor geometrice ale structurii (varianta I,  $E=100$  kJ,  $v=10$  m/s);
- anularea efectelor impactului în zonei avariate de pe înveliș, pentru variantele în care energiile au generat atingerea stadiului plastic, pentru varianta de dimensionare a caracteristicilor geometrice ale structurii (varianta II,  $E=100$  kJ,  $v=10$  m/s);
- reducerea cu 29.65% a ariei și cu 1.67% a volumului osaturii avariate, pentru variantele în care energiile au generat atingerea stadiului de rupere, față de valori similare ale geometriei inițiale, pentru varianta de dimensionare a caracteristicilor geometrice ale structurii (varianta II,  $E=400$  kJ,  $v=20$  m/s);
- diminuarea zonei avariate pe înveliș, prin modificarea curburii osaturii, cu 11.54% numai pentru  $\mu=0.6$ , față de valori similare ale geometriei inițiale (varianta III,  $E=100$  kJ,  $v=10$  m/s);

Din acest studiu se pot desprinde următoarele concluzii sintetice:

- a) Navele sunt proiectate în prezent, prin studierea comportamentului în domeniul elastic. Răspunsul în domeniul plastic și de rupere este studiat numai pentru situații accidentale, prevăzute de societățile de clasificare (DNVGL-RP-204).
- b) Analiza numerică pe baza Metodei cu Elemente Finite permite investigarea soluțiilor de proiectare a geometriei navei pentru îmbunătățirea comportării structurilor la impact.
- c) S-au proiectat șase modele structurale navale (varianta I, varianta II și 4 pentru varianta III) care să corespundă obiectivelor impuse (diminuarea tensiunilor din structură și diminuarea zonei avariate în urma impactului), prin utilizarea analizei numerice pe baza Metodei Elementelor Finite pentru comportarea în domeniul plastic.

## 6.2 Contribuții personale

Scopul activității de cercetare realizate în cadrul acestei teze a fost conceperea unei proceduri pentru modificarea structurii zonei prova a barjei 2000T, care să răspundă cerințelor de creștere a siguranței în exploatare precum și a normelor societăților de clasificare.

Atingerea scopului menționat anterior are la bază următoarele contribuții originale:

- 1) Validarea metodologiei de calcul, prin alegerea unui model de material, verificat experimental și prin simulare numerică în capitolul 2, pentru care marja de eroare față de valorile măsurate experimental se încadrează în marja de eroare acceptată.
- 2) Analiza diverselor efecte produse de impactul bordajului barjei în diverse scenarii de viteză și energie cinetică de impact. Stabilirea parametrilor de intrare, pentru analiza

numerică, pe baza Metodei cu Elemente Finite, la calculul structurii zonei prova a barjei 2000T, pe baza datelor experimentale.

3) Compararea rezultatelor obținute și determinarea de soluții pentru îmbunătățirea structurii încă din faza de proiectare. Studiarea soluțiilor privind influența geometriei asupra tensiunilor unei structuri are la bază următoarele direcții principale:

- dimensionarea învelișului în zona afectată pentru preluarea tensiunilor (varianta II,  $E=100$  kJ,  $v=10$  m/s).
- dimensionarea osaturii în zona afectată pentru diminuarea efectelor impactului (varianta I,  $E=400$  kJ,  $v=20$  m/s);
- dimensionarea învelișului în zona afectată pentru diminuarea efectelor impactului (varianta II,  $E=400$  kJ,  $v=20$  m/s);
- modificarea curburii osaturii pentru diminuarea efectelor impactului (varianta III,  $E=100$  kJ,  $v=10$  m/s);

4) Modificarea geometriei unei structuri din zona prova a barjei 2000 T având drept obiective principale diminuarea tensiunilor din structură și diminuarea zonei avariate în urma impactului. Dezvoltarea a șase modele structurale 3D-FEM pentru studiul comparativ al structurilor reproiectate. S-au obținut următoarele beneficii:

- diminuarea tensiunilor Von Mises de 3.47% ale osaturii față de valorile similare ale geometriei inițiale, pentru varianta în care energiile au generat atingerea stadiului plastic, prin dimensionarea caracteristicilor geometrice ale structurii;
- anularea efectelor impactului în zona avariata de pe înveliș, pentru variantele în care energiile au generat atingerea stadiului plastic, prin dimensionarea caracteristicilor geometrice ale structurii (modificarea grosimii tablei învelișului, varianta II) ;
- reducerea cu 29.65% a ariei și cu 1.67% volumului osaturii avariate, pentru variantele în care energiile au generat atingerea stadiului de rupere față de valori similare ale geometriei inițiale, prin dimensionarea caracteristicilor geometrice ale structurii (modificarea grosimii tablei elementelor de osatură, varianta I) ;
- reducerea cu 11.54% a ariei avariate pe înveliș numai pentru  $\mu=0.6$  față de valori similare ale geometriei inițiale, prin modificarea curburii osaturii, ceea ce permite o creșterea flotabilității la avarie a noii geometrii (varianta III, model 3).

- 5) Dezvoltarea metodologiei de proiectare pentru realizarea unei structuri care să ofere o comportare corespunzătoare la impact.
- 6) Dezvoltarea unei metodologii rapide de calcul pentru situații de impact la care se produc avarii care pot cauza inundarea unor compartimente sau chiar scufundarea navei astfel încât să se poată lua decizii de rezolvare eficientă a problemelor.

### 6.3 Direcții viitoare de cercetare

1) Studiarea impactului, prin metoda cuplată, a comportării structurii zonei prova a unei structuri navale în domeniul plastic, analizând simultan comportamentul hidrodinamic și cel structural al modelului ce include și forțele de inerție, solicitări globale, locale și de impact.

2) Realizarea de experimente pe cât posibil pe structuri la scară naturală (lucru care în acest moment s-a realizat de către foarte puțini cercetători din cauza costurilor implicate), pentru studiul influenței frecării și a diverselor materiale, care să permită extinderea metodelor de calcul pentru cedarea materialului.

3) Soluțiile investigate în această lucrare se pot fi utiliza în scopul optimizării procedurilor legate de repararea barjelor avariate.

4) Având în vedere grija pentru protecția mediului înconjurător, referitoare la traficul pe apele interioare, devine necesar ca în viitor acest tip de analiză să fie inclusă ca o normă de proiectare a societăților de clasificare, pentru toate categoriile de nave. Regulile ar putea viza:

- realizarea curbelor de risc la impact, prin determinarea tensiunilor datorate solicitării la impact, pe lungimea navei;
- determinarea, mai precisă, a deformațiilor plastice critice, la rupere etc.



## BIBLIOGRAFIE

- [ 1 ] Domnișoru L, *Analiza structurală și hidroelasticitatea navelor*, Galați, Editura Fundației Universitare "Dunărea de Jos" Galați, 2006, pag.300-350;
- [ 2 ] Petersen M.J. , *Dynamics of Ship Collision*, Ocean Engineering, Vol.9, No.4, pag. 295-329, 1982;
- [ 3 ] Woisin G., *Instantaneous loss of energy with unsymmetrical ship collision*, Schiff&Hafen, Vol.40, No.1, pag.50-55,1988;
- [ 4 ] Pawlowski M., *Energy loss in ship's collisions*, Centrum Techniki Okretowej, Poland, 1995;
- [ 5 ] Hanhirova H., *External collision model, safety of passanger/RoRo Vessels*, Helsinki ,University of Technology, Ship Laboratory, Oct.1995;
- [ 6 ] Zhang S., *The mechanics of ship collision*, Technical University of Denmark, Denmark
- [ 7 ] Minorsky V.U., *An analysis of ship collision with reference to protection of nuclear power ships* , J. of Ship Research, Vol. 3, No.2, pag.1-4, 1959;
- [ 8 ] Woisin G., *Design against collision*, Schiff&Hafen, Vol.31, No.2,pag. 1059-1069, Germania, 1979;
- [ 9 ] Vaughan H., *Bending and tearing of plate with application to ship bottom damage*, Naval Architects, Vol. 3, pag.97-99, 1978;
- [10] Reckling K.A., *Mechanism of minor ship collision*, Int.J. of Impact Engineering, Vol.13, No.2, pag.163-187,1983;
- [11] Pedersen P.T., Valsgaard S., Olsen D., Spangenberg S.I., *Ship impact: Bow collisions*, Int.J. of Impact Engineering, Vol.13, No.2, pag.163-187,1993;
- [12] Gerard G., *The crippling strength of compression element*, Int.J. of Aeronautical Science, 1958;
- [13] Amdahl J., *Energy absorption in ship-platform impact*, Norwegian Institute of Technology, Report No.UR-83-34, 1983;
- [14] Yang P.D.C. și Caldwell J.B., *Collision energy absorption of ship bow structure*, Int. J. Impact Engineering, Vol.b 7, No. 2, pp. 181-196,1988;
- [15] Pedersen P.T., *Ship crushing load studies*, Chapter 3.6, East Bridge, The Storebelt Publications, Editor Niels Gimsing, pag.44-57,1998;
- [16] Wierzbicki T., Abramowicz W., *On the crushing mechanism of thin walled structures*, Journal of Applied Mechanism, Vol. 50, 1983;
- [17] Wierzbicki T., Thomas P., *Closed-form solution for wedge cutting force through thin metal sheet*, Int. J. Mech. Sci, Vol.35, No. 3/4, pag. 209-229, 1993;
- [18] Abramowicz W., *Crushing resistance of T.Y. and X section*, MIT-Industry joint program on tanker safety, Massachusetts Institute of Technology, U.S.A., Report No. 24, 1994;
- [19] Kierkegaard H. , *Ship bow response in high energy collision*, Marine Structure, No.6, 1993;
- [20] Paik J.K., Pedersen P.T., *Ultimate and crushing strength of plated structures*, J. of ship research, Vol.39, No.3, pag.340-348, 1995;
- [21] SimonsenB.C., *The mechanism of ship grounding*, Technical University of Denmark, Ph.D.thesis, 1997;
- [22] Jones N., *Structural impact*, Cambridge University Press, 1989;
- [23] Jones N.,Wierzbicki T., *Structural crashworthiness and failure*, Elsevier Applied Science, 1993;
- [24] Wang G., *Structural analysis of ship collision and grounding*, Ph.D.thesis, University of Tokyo, 1995;
- [25] Wen H.M, Jones M., *Experimental investigation of the scaling laws for metals plates struck by large masses*, Int. J.Impact Engineering, vol. 13, no. 3, pag. 485-505,1993;

- [26] Amdahl J. și Kavlie D. , *Experimental and numerical simulation of double hull standing*, DNV-MIT Work Shop on Mechanism of Ship Grounding, DNV, Norway, 1992;
- [27] Amandl J., *Side collision*, 22<sup>nd</sup> WEGEMENT Graduate School, Technical University of Denmark, 1995;
- [28] McDermott J., Kline R., Jones E., Maniar N. and Chiang W., *Tanker structural analysis for minor collision*, SNAME Transactions, 1974;
- [29] Jones N., *A Literature survey on the collision and grounding protection of ships*, Ship Structurers Committee Report, SSC-283,1979;
- [30] Ellinas E.D. și Valsgard S., *Collision and damage of offshore structures a state of art*, 4th Int. Symposium on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Dallas, Texas, February 17-22, 1985;
- [31] Samuelides E și Frieze P.A., *Fluid structure interaction in ship collision*, Marine Structures, Vol.2.,pp.65-88,1989.
- [32] Akita Y., s.a., *Studies on collision-protective structures in nuclear powered ships*, Nuclear Engineering Design, No.19, 1972;
- [33] Ito H. s.a., *A simplified method to analysis the strength of double hulled structures in collision*, 1<sup>st</sup> report, J. of Naval Arch. Of Japan, 1984;
- [34] Qvist S. s.a., *Ship Collision . Experimental and numerical analysis of double hull models*, 9<sup>th</sup> DYMAT Technical Conference,1995;
- [35] Hagiwara K., Takanabe H., Kawano H., *A proposed method of predicting ship collision damage*, Int.J. of Impact Engineering, Vol.I, No.3,1983;
- [36] Abramowicz W. și Jones N., *Dynamic progressive buckling of circular and square tubes*, Int.J. of Impact Engineering, Vol. 4, No. 4, pp.243-270, 1986;
- [37] Ishiyama S., s.a. , *Impact response of thin walled plane frame structures*, Int. J. Impact. Eng, Vol. 1, No.3, pag.227-247, 1983;
- [38] Simonsen B.C. și Ocakli H., *Experiments and theory on deck and girder*, 1999;
- [39] Kitamura O., *Comparative study on collision resistance of side structure*, International Conference on Design and Methodologies for Collision and Grounding Protection of Ships, San Francisco, California, U.S.A. August 22-23, 1996, “ Marine Technology”, Vol. 34, No.4, pag.293-308, 1997;
- [40] Sano A., Muragish O. și Yoshikawa T., *Strength analysis of a new double hull structure for VLCC in collision*, International Conference on Design and Methodologies for Collision and Grounding Protection of Ships, San Francisco, California, U.S.A, August, 22-23, 1996;
- [41] Kuroiwa T., *Numerical simulation of actual collision & grounding accidents*, International Conference on Design and Methodologies for Collision and Grounding Protection of Ships, San Francisco, California, U.S.A., August 22-23, 1996;
- [42] Cook R.D., Malkus D.S., Plesha M.E., Witt R.H., *Concepts and application of finite element analysis*, 2002;
- [43] Myhre S.A., *Analysis of accidental iceberg impacts with membrane tank LNG carriers - Master Thesis*, Norwegian University of Science and Technology, Norway, 2010;
- [44] Ansys Inc., *ANSYS Release 13.0 Guide*, Ansys Inc., USA, 2010;
- [45] Livermore Software Technology Corporation (LTSC) : *LS-DYNA*, Livermore, California, USA, [www.ltsc.com/products/ls-dyna](http://www.ltsc.com/products/ls-dyna);
- [46] Bălan M., Domnișoru L., *Numerical analysis of a ship side collision structural response based on the finite element method*, Annals of “Dunarea de Jos” University of Galati, Galati University Press, pag. 51-60, 2012;
- [47] Bathe, K.J., Chapelle, D., *The Finite Element Analysis of Shells. Fundamentals*, Springer Publishing House, 2nd ed, 2011;

- [48] Liu Z., Amdahl J. " A new formulation of the impact mechanics of ship collision and its application to a ship-iceberg collision", *Marine Structure*, Elsevier Press, pag.360-384, 2010;
- [49] Pedersen, P.T., Li, Y., *On the global ship hull bending energy in ship collision*, *Marine Structures*, Vol. 22, No 1, pag. 2-11, Elsevier LTD, England, DOI://org.doi/10.1015/marstruc.2008.06.005, 2009;
- [50] Gom mbH, Calibration, *Aramis User Manual -Software*, pag. 4-7, 2007;
- [51] \*\*\*, <http://www.dnvgl.com>, *DNVGL-RP-C204 Recommended practice – Design against accidental loads*, 2017;
- [52] \*\*\*, Autoritatea Navală Română- *Albumul tipurilor de nave*, 2006;
- [53] Domnisoru, L, *Special chapters on ship's structures analysis. Applications*. Editura Fundației Universitare 'Dunărea de Jos' Galați, ISBN 978-973-627-589-0, 2017;
- [54] Liu C.Y., Glass D., *Effects of mesh density on finite elements analysis*, SAE World Congress & Exhibition, <https://doi.org/10.4272/2013-01-1375>, 2013;
- [55] \*\*\*, <http://www.dnvgl.com>, *DNVGL-CG-0127 Class guideline – Finite element analysis*, 2018;
- [56] Alsos S. H., Amdahl J., *On the resistance to penetration of stiffened plates, Part 1- Experiments*, *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 36, pag. 799- 807, 2009;
- [57] \*\*\*, <http://www.dnvgl.com>, *DNV-GL-RP- C208 Recommended practice - Determination of structural capacity by non-linear finite element analysis methods*, 2013;
- [58] \*\*\*, <http://www.dnvgl.com>, *DNV GL-OS-C102- Structural design of offshore ships* , 2018;
- [59] Orymowska J., Sobkowicz P., *Navigational safety of inland vessels in the Międzyodrze and Szczeciński Węzeł Wodny area*, *Scientific J. of the Maritime Univ. of Szczecin*, Vol. 49, pag. 93-99, 2017;
- [60] Guerro D., *Impact of transport connections on port hinterlands*, *Regional Studies*, Vol. 53, No. 4, pag. 540- 549, 2019;
- [61] Popa C, Barbu G, *Managementul transporturilor pe apele interioare*. Editura Constanța, 2013;
- [62] Sha, YY., Amandl, J., Liu, K., *Design of steel girder against ship forecastle*, *Engineering Structures*, Vol. 196, Elsevier SCI LTD, England, DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109277, 2019;
- [63] Fan, W., Yuan, WC., *Ship bow force-deformation curves for ship impact demand of bridges considering effect of pile-cap depth*, *Shock and Vibration*, Hindawi Publishing Corporation, USA, DOI: 10.1155/2014/201425, 2014
- [64] Wang L, Yang L., Huang D., Zhang Z., Chen G., *An aspect of a dynamic analysis on a new crashworthy device against ship-bridge collision*, *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 35, pag.895-904. 2008;
- [65] \*\*\*, <http://www.femap.com>, *Femap User Guide version 11.3*, Siemens Product Lifecycle Management Software, 2016;
- [66] \*\*\*, *NX Nastran Getting Started Tutorials*, Siemens Product Lifecycle Management Software, 2014;
- [67] \*\*\*, *NX Nastran - Theoretical Manual* , Siemens Product Lifecycle Management Software, 2014.