

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Игор А. Бачкалов
НЕЛИНЕАРНО ВАЉАЊЕ БРОДА
ПОД ДЕЈСТВОМ ВЕТРА И ТАЛАСА

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Београд 2010.

Универзитет у Београду
Машински факултет

Игор А. Бачкалов

**Нелинеарно ваљање брода
под дејством ветра и таласа**

докторска дисертација

Београд, 2010.

Комисија за преглед и одбрану:

Ментор: Проф. др Милан Хофман,
Машински факултет у Београду

Чланови Комисије: Проф. др Дејан Радојчић,
Машински факултет у Београду
Проф. др Милорад Моток,
Машински факултет у Београду
Проф. др Владета Чолић,
Саобраћајни факултет у Београду
Проф. др Зоран Радмиловић,
Саобраћајни факултет у Београду

Датум одбране:

"The wisdom of life consists in the elimination of nonessentials."

Lin Yutang

Предговор

У раду *Нелинеарно ваљање брода под дејством ветра и таласа* представљени су резултати вишегодишњег истраживања изведеног на Катедри за бродоградњу Машинског факултета Универзитета у Београду. Аутор је био члан тима истраживача – инжењера бродоградње, који је испитивао проблем динамичког стабилитета морских и речних бродова у светлу понашања брода на таласима и рачуна вероватноће.

Резултати истраживања делимично су публиковани у стручним часописима од међународног значаја и, у више наврата, представљени домаћој и страниј стручној јавности. Такође, истраживање из којег је проистекао овај рад награђено је међународним признањем *RINA-Lloyd's Register Educational Trust Ship Safety Award* за 2007. годину.

Аутор дугује велику захвалност ментору, који је иницирао и осмислио истраживање и, стрпљиво и подстицајно, руководио радом. Многе оригиналне идеје, закључци и решења, инкорпорирана у овај рад, његово су дело. Такође, Аутор се захваљује породици на несебичној подршци и пријатељима који су, свако на свој начин, допринели успешном завршетку рада.

Београд, октобар 2009.

Игор Бачкалов

Садржај

Апстракт	1
Abstract.....	4
Номенклатура.....	6
1. Увод.....	10
1.1 Пробабилистичка анализа сигурности брода	10
1.2 Примена пробабилистичке анализе у инжењерској пракси	11
2. Модели нелинеарног ваљања	14
2.1 Модели нелинеарног ваљања са једним степеном слободе.....	15
2.2 Модели нелинеарног ваљања са два степена слободе.....	21
2.3 Литература	29
3. Развој пробабилистичких прописа	31
3.1 Развој прописа заснованих на постављеном циљу (Goal-based Standards).....	32
3.2 Сигурност заснована на процени ризика. SAFEDOR пројект	34
3.3 Пробабилистички прописи о динамичком стабилитету брода	36
3.3.1 Пробабилистички прописи о динамичком стабилитету морских бродова у бочној олуји.....	37
3.3.2 Пробабилистички прописи о динамичком стабилитету речних бродова у бочној олуји.....	42
3.4 Литература	45
4. Критичка анализа постојећих прописа о стабилитету	48
4.1 Критичка анализа Критеријума временских услова	48
4.2 Критичка анализа постојећих прописа о стабилитету речних контејнерских бродова.....	56
4.3 Анализа пробабилистичких прописа о стабилитету бродова намењених за приобалну пловидбу	75

4.4 Литература	83
5. Пробабистичка анализа бродолома	85
5.1 Анализа поморске несреће Ро-Ро брода Кугар Ејс	86
5.2 Литература	93
6. Пројектовање на основу ризика	94
6.1 Оптимална метацентарска висина	95
6.2 Неке смернице за пројектовање речних контејнерских бродова	100
6.3 Литература	106
7. Закључне напомене и смернице за будућа истраживања	108
Биографија	112

Апстракт

Прорачун ваљања брода на узбурканом мору представља један од најзначајнијих проблема динамике брода. Уобичајено је да се проблем решава линеарном једначином ваљања брода на таласима, при чему се утицај ветра занемарује, а добијена решења важе само за мале углове накретања. Насупрот томе, истраживање представљено у овом раду заснива се на нелинеарним диференцијалним једначинама кретања брода изложеног стохастичком дејству нерегуларних бочних таласа и удара бочног ветра које симулирају понашање брода у реалној бочној олуји. Нумеричким решавањем једначина кретања добија се закон ваљања. Статистичком анализом закона ваљања одређује се вероватноћа губитка стабилитета брода: превртања, великих углова накретања или наплављивања кроз незаштићене отворе. Овај поступак назван је пробабилистичка анализа сигурности брода у олуји. Иако пробабилистичка анализа није нов поступак, низ нелинеарних модела кретања брода развијено је нарочито за потребе представљеног истраживања.

У раду је представљено више механичких модела нелинеарног ваљања, разматрана су питања везана за моделовање утицаја удара ветра, предложен је концепт будућих пробабилистичких прописа о стабилитету брода, а пробабилистички поступак примењен је и у анализи сигурности бродова унутрашње пловидбе, истраживању узрока поморских несрећа и пројектовању брода на основу ризика.

У раду су представљени следећи модели љуљања брода, развијени током истраживања: модели са једним степеном слободе (независне нелинеарне једначине ваљања) и модели са два степена слободе (спрегнуте нелинеарне независне једначине ваљања и заносења) морских бродова изложених дејству променљивог бочног ветра и нерегуларних таласа и речних бродова под дејством променљивог бочног ветра. Сваки модел садржи више извора нелинеарности: момент стабилитета апроксимиран полиномом високог степена, нелинеарно пригушење кретања, момент ветра. Посебна пажња поклоњена је исправном моделовању хаотичног, ударног ветра.

Пробабилистичка анализа може се користити у разноврсним проблемима сигурности брода. Развој нових прописа о стабилитету брода једна је од области у

којима овај приступ налази примену. У раду је најпре изложен преглед напретка постигнутог на пољу развоја будућих прописа о сигурности брода заснованих на ризику. Затим, представљен је концепт могућих пробабилистичких прописа о стабилитету морских и речних бродова. Такође, у раду је предложена и дозвољена вероватноћа губитка стабилитета P_{req} . Осим тога, у раду је указано на неке недостатке студија сигурности које користе Formal Safety Assessment методу а који се односе на употребу статистичких података о несрећама и тзв. Severity Index-а.

Пробабилистички приступ сигурности брода примењен је у критичкој анализи постојећих, детерминистичких прописа о стабилитету: ИМО Критеријума временских услова, прописа Југорегистра о стабилитету бродова унутрашње пловидбе, прописа о стабилитету речних контејнерских бродова Економске комисије Уједињених нација за Европу, али и првих пробабилистичких прописа који су ушли у употребу – белгијских прописа о сигурности речних бродова намењених обалној пловидби. Показало се да детерминистички прописи садрже низ недоследности. У неким случајевима, постојећа правила не успевају да обезбеде довољну сигурност брода у олуји. Са пробабилистичке тачке гледишта, неки бродови не би се могли сматрати сигурним, упркос томе што задовољавају захтеве у погледу стабилитета које прописују детерминистичка правила. Такође, у раду су разматране неке мере за побољшање постојећих прописа о стабилитету речних контејнерских бродова.

Пробабилистички приступ примењен је и у истраживању узрока несреће брода за превоз аутомобила Кугар Ејс (*Cougar Ace*), једне од најзначајнијих поморских несрећа у 2006-ој. У раду су приказане предности употребе нелинеарних модела кретања брода и статистичке анализе закона кретања, у односу на класичне алате за анализу проблема стабилитета – дијаграме момента стабилитета. Пробабилистичка анализа омогућава ефикасније и поузданије испитивање стварних узрока бродолома.

Примена пробабилистичке анализе у поступку пројектовања на основу ризика омогућава увођење иновативних техничких решења насталих у циљу повећане ефикасности и сигурности. Дефиниције опсега прихватљивих метацентарских висина (ограниченог максималном метацентарском висином) и оптималне метацентарске висине морских бродова представљају вероватно најзначајнији допринос рада пројектовању на основу ризика. Пробабилистичка анализа има способност рангирања бродова према сигурности у бочној олуји што пројектантима може помоћи да дају предност оном техничком решењу које обезбеђује виши ниво сигурности. Осим тога, резултати анализе сигурности бродова унутрашње пловидбе, добијени пробабилистичким поступком, искоришћени су како би се добиле неке смернице за пројектовање речних контејнерских бродова.

Конечно, у раду је указано на могуће задатке неких будућих истраживачких пројеката.

Кључне речи: Нелинеарно ваљање брода, хаотични ветар, пробабилистичка анализа, процена сигурности, стабилитет брода, пробабилистички прописи, детерминистички прописи, речни контејнерски брод, поморске несреће, пројектовање на основу ризика

Научна област: Машинство

Ужа научна област: Бродоградња

Abstract

Rolling of ships in severe weather is one of the most important problems of ship dynamics. Typically, the problem is solved by using a linear differential equation of rolling; the influence of wind is neglected and the obtained solutions are valid for small roll angles only. However, the research presented in this thesis makes use of a very dissimilar approach, based on nonlinear differential equation(s) of motion of a ship subjected to stochastic action of irregular beam waves and gusting beam wind (the beam storm). The equations of motion are numerically solved to obtain the time history of ship roll. Acquired time history is statistically analyzed in order to assess the probability of a ship stability failure: capsize, large amplitude rolling or flooding through unsecured openings. This two-phase approach is denoted as the **probabilistic analysis of ship safety**. While the general approach itself is not a novelty, the most of the nonlinear models used are developed originally for the present investigation.

The thesis establishes several nonlinear models of rolling, discusses the issues related to the modeling of gusting wind, proposes the concept of the future probabilistic ship stability regulations, and extends the probabilistic analysis to the safety of inland vessels, the analysis of marine accidents and the risk-based ship design.

The thesis introduces following models of ship motion, developed in the course of the research: one degree-of-freedom models (single nonlinear differential equations of roll) and two degrees-of-freedom models (coupled nonlinear differential equations of sway and roll) of seagoing ships exposed to beam waves and wind gusts and inland vessels subjected to gusting wind. Each model contains several sources of nonlinearity: nonlinear righting lever, nonlinear coefficients of damping, wind moment, etc. Particular attention was paid to proper modeling of gusting wind.

Probabilistic analysis may be used in a variety of ship safety problems, such as the development of the future ship stability regulations. Firstly, the thesis reviews the present efforts in the development of risk-based ship safety regulations. Secondly, the concepts of possible future probabilistic ship stability regulations are introduced, both for the seagoing and inland vessels. The thesis also proposes the level of acceptable probability of stability failures P_{req} . In addition, the thesis indicates some shortcomings of the present Formal Safety Assessment studies regarding the use of accident statistics and Severity Index.

Furthermore, probabilistic approach to ship safety was applied in the critical analysis of present, prescriptive (deterministic) ship stability regulations: IMO Weather Criterion, Jugoregistar inland vessels stability regulations and stability regulations for inland container vessels issued by the United Nations Economic Commission for Europe. The very first probabilistic ship stability regulations which entered into force, the Belgian safety regulations for estuary vessels, were analyzed as well. It was found that prescriptive regulations suffer from number of inconsistencies. In some cases, present regulations even fail to provide for the sufficient safety in severe weather. From the probabilistic point of view, some ships may not be considered as safe, in spite the fact that they fulfill stability requirements prescribed by the present regulations. The thesis also proposes some options for the improvement of the present stability regulations for inland container vessels.

Analysis of a marine accident using the probabilistic approach was conducted on one of the most significant accidents in 2006, the car carrier *Cougar Ace* case. The thesis demonstrates the advantages of using nonlinear models of ship motion and statistical analysis, over the classical tools based on the righting arm charts. The benefits brought by probabilistic analysis include efficient and more reliable investigation of actual causes of an accident.

The application of the probabilistic analysis in the risk-based ship design emerges as a promising technique for introduction of innovative ideas that aim to provide for the increased efficiency and safety. Probably the most significant contributions of the thesis to the field of risk-based design are the definitions of the range of acceptable metacentric heights (bounded by the maximum value of MG) and optimal metacentric heights of seagoing ships. Being capable of ranking ships against the safety in beam storms, probabilistic analysis introduces a powerful feature that may assist ship designers in decision-making process. Additionally, the results obtained by the probabilistic analysis of safety of inland vessels are used to develop some guidelines for design of (future) inland container vessels.

Finally, the thesis attempts to indicate possible tasks of some future research projects.

Keywords: Nonlinear Rolling of Ships, Gusting Wind, Probabilistic Analysis, Safety Assessment, Ship Stability, Probabilistic Regulations, Prescriptive Regulations, Inland Container Vessel, Marine Accidents, Risk-Based Design

Scientific discipline: Mechanical Engineering

Scientific subdiscipline: Naval Architecture

Номенклатура

A_n	амплитуда n -те компоненте таласа	[m]
A_s	подводна латерална површина брода	[m ²]
A_w	надводна латерална површина брода	[m ²]
B	ширина брода	[m]
B_n	амплитуда n -те компоненте удара ветра	[m/s]
C_B	коефицијент пуноће истиснућа	–
C_w	коефицијент отпора ваздуха	–
D	депласман	[t]
F_B	висина слободног бока	[m]
F_{hyd}	хидродинамичке силе спрегнутог ваљања и заношења	[kN]
$f_{\varphi n}$	преносна функција нелинеарног ваљања под дејством ветра	[rad]
F_s	нелинеарна сила отпора воде заношењу	[kN]
\bar{F}_s	сила „држања брода на курсу“	[kN]
F_w	сила ветра	[kN]
F_{η}^D	Дифракциона сила заношења услед дејства таласа	[kN]
F_{η}^{FK}	Фруд-Криловљева сила заношења услед дејства таласа	[kN]
h	крак стабилитета брода	[m]
h'	крак додатног стабилитета брода	[m]
h_c	висина пражнице	[m]
H_s	значајна висина таласа	[m]
J_x	момент инерције брода за осу x	[tm ²]
K	коефицијент храпавости терена	–
L	дужина брода	[m]
l_d	крак динамичког момента ветра	[m]
l_s	крак момента који ствара нелинеарна сила отпора воде заношењу	[m]
l_{st}	крак статичког момента ветра	[m]
l_w	крак момента ветра	[m]
l_z	крак момента ветра (у општем случају)	[m]
M_d	момент пригушења ваљања	[kNm]

M_d^{pot}	потенцијални део момента пригушења ваљања	[kNm]
M_d^{vis}	вискозни део момента пригушења ваљања	[kNm]
M_{exc}	побудни момент	[kNm]
MG, \overline{MG}	метацентарска висина	[m]
MG_{max}	максимална метацентарска висина	[m]
MG_{min}	минимална метацентарска висина	[m]
M_{hyd}	хидродинамички момент спрегнутог ваљања и заношења	[kNm]
M_s	момент који ствара нелинеарна сила отпора воде заношењу	[kNm]
\overline{M}_s	момент који ствара сила „држања брода на курсу“	[kNm]
M_{st}	момент стабилитета	[kNm]
M_w	момент ветра	[kNm]
m_η	додатна маса при заношењу	[t]
$m_{\eta\varphi}$	додатна маса заношења при ваљању (или ваљања при заношењу)	[tm]
m_φ	додатна маса при ваљању	[tm ²]
M_φ^D	Дифракциони момент ваљања услед дејства таласа	[kNm]
$M_\varphi^{FK}, M_\varphi$	Фруд-Криловљев момент ваљања услед дејства таласа	[kNm]
N_c	број превазилажења средњег угла ваљања (број циклуса)	–
N_{sf}	број губитака стабилитета	–
n_η	коэффицијент линеарног пригушења заношења	[t/s]
$n_{\eta\varphi}$	коэффицијент пригушења при ваљању (или ваљања при заношењу)	[tm/s]
n_φ	коэффицијент потенцијалног пригушења ваљања	[tm ² /s]
\overline{OG}	растојање тежишта од водне линије	[m]
P	вероватноћа	–
P_{33}	вероватноћа накретања брода до 33% од φ_{fl}	–
P_{50}	вероватноћа накретања брода до угла од 50°	–
P_{67}	вероватноћа накретања брода до 67% од φ_{fl}	–
P_{cap}	вероватноћа превртања	–
$P_{cap,annual}$	вероватноћа превртања на годишњем нивоу	–
P_{fl}	вероватноћа наплављивања брода кроз незаштићене отворе	–
P_{nsf}	вероватноћа да неће доћи до губитка стабилитета	–
P_{req}	дозвољена вероватноћа	–
P_{sf}	вероватноћа губитка стабилитета	–

R	ризик	–
S	квантификована озбиљност несреће	–
S	спектар таласа	$[m^2/s]$
S_w	спектар ветра	$[m^2/s]$
S_φ	стандардна девијација ваљања	$[rad]$
t	време	$[s]$
T	газ брода	$[m]$
T_{exp}	време трајања олује	$[s]$
T_φ	средњи период ваљања	$[s]$
v_w	брзина ветра	$[m/s]$
\bar{v}_w	средња брзина ветра	$[m/s]$
v'_w	флуктуације брзине ветра	$[m/s]$
v_{wrel}	релативна брзина ветра	$[m/s]$
\bar{v}_η	константни део брзине заносења	$[m/s]$
β	коэффициент квадратног члана пригушења ваљања	–
β_n	фазни померај n -те компоненте удара ветра	–
η	заносење брода	$[m]$
$\dot{\eta}$	брзина заносења брода	$[m/s]$
$\ddot{\eta}$	убрзање заносења брода	$[m/s^2]$
η'	флуктуација заносења брода	$[m]$
μ	коэффициент линеарног пригушења ваљања	–
v_{sf}	учестаност превазилажења угла губитка стабилитета	$[s^{-1}]$
v_φ	учестаност превазилажења средњег угла ваљања	$[s^{-1}]$
ρ	густина воде	$[t/m^3]$
ρ_a	густина ваздуха	$[t/m^3]$
φ	угао ваљања, угао накретања брода	$[rad, ^\circ]$
$\dot{\varphi}$	угаона брзина ваљања	$[rad/s]$
$\ddot{\varphi}$	угаоно убрзање ваљања	$[rad/s^2]$
$\bar{\varphi}$	средња вредност угла ваљања	$[rad]$
φ_{cap}	угао превртања	$[rad, ^\circ]$
φ_{fl}	угао наплављивања брода кроз незаштићене отворе	$[rad, ^\circ]$
φ_{sf}	угао при којем долази до губитка стабилитета	$[rad, ^\circ]$
φ_c	критични угао, према UNECE прописима	$[rad, ^\circ]$

ω_n	фреквенција n -те компоненте (таласа или удара ветра)	[rad/s]
ω_φ	сопствена фреквенција ваљања	[rad/s]

Скраћенице коришћене у раду

ALARP	As Low As Reasonably Practicable
BSC	Bretschneider Spectrum
FSA	Formal Safety Assessment
GBS	Goal-based Standards
HAZID	Hazard Identification
ICLL	International Convention on Load Lines
IMO	International Maritime Organization
IS	Intact Stability
JON	JONSWAP Spectrum
PM	Pierson-Moskowitz Spectrum
STF	Salvesen, Tuck, Faltinsen
SAFEDOR	Design, Operation and Regulation for Safety
SOLAS	Safety of Life at Sea
TEU	Twenty-foot Equivalent Unit
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe

1. Увод

Прорачун кретања брода на узбурканом мору представља посебан изазов за инжењере бродоградње који треба да обезбеде сигурност брода у екстремним, али реалним временским приликама. Иако се проблем већ дуго изучава (пионирске радове у области кретања брода на таласима објавили су понаособ још и Фруд и Крилов), а постоји и заиста обимна литература¹, многи значајни аспекти проблема и даље су недовољно проучени. Један од важних аспеката кретања брода на таласима, који има широку примену у бродографевној пракси, представља ваљање брода под дејством бочног ветра и таласа. Уобичајено је да се проблем ваљања брода на таласима решава линеарном диференцијалном једначином у којој је утицај ветра занемарен и чија решења важе само за мале углове ваљања. Овај рад посвећен је другачијем, иновативном приступу проблему који се заснива на решавању нелинеарних диференцијалних једначина кретања брода изложеног стохастичком дејству нерегуларних таласа и нестационарног ветра. Овакав приступ има велике могућности примене, које ће у наставку бити укратко изложене.

1.1 Пробабистичка анализа сигурности брода

У раду су представљени резултати вишегодишњег истраживања изведеног на Катедри за бродоградњу Машинског факултета Универзитета у Београду. Аутор је био члан тима истраживача који је испитивао проблем динамичког стабилитета морских и речних бродова у светлу понашања брода на таласима и рачуна вероватноће.

Окосницу истраживања чини поступак анализе нелинеарног ваљања брода под дејством ветра и таласа, који се састоји из две фазе. У првој фази, закон ваљања добија се нумеричким решавањем механичког модела нелинеарног ваљања. Одговарајући нелинеарни модел понашања брода у олуји треба да обухвати кретања значајна за сигурност брода, али и да буде довољно једноставан и прилагођен свакодневној техничкој примени. Истраживање укључује више

¹ Примера ради, у првом поглављу монографије *Seakeeping*, објављене 1961. Корвин-Круковски наводи чак 479 референци релевантних за кретање брода на таласима

оригиналних нелинеарних модела који симулирају кретање брода под дејством бочног ветра и таласа (код морских бродова) или бочног ветра (код речних бродова). У питању су диференцијалне једначине кретања са једним степеном слободе (ваљање) или два степена слободе (ваљање спрегнуто са заношењем). Једначине садрже нелинеарне чланове: нелинеарно пригушење кретања, момент стабилитета, момент ветра. Принудне силе потичу од нерегуларних таласа и стохастичког дејства ветра због чега се прорачунавају помоћу одговарајућих спектра енергије. Важан део истраживања био је посвећен утицају ветра на ваљање, којем се у класичним прорачунима приступа поједностављено, а у студијама понашања брода на таласима често се сасвим игнорише. Да би се моделирали принудна сила и момент ветра, требало је анализирати различите храпавости околног терена (што је било нарочито важно код речних бродова код којих вредност коефицијента храпавости зависи од подручја пловидбе), испитати различите дефиниције крака момента ветра, однос брзине ветра и висине таласа, итд. Решење једначина представљају закони кретања: ваљања, односно ваљања и заношења. Модели нелинеарног ваљања, развијени у оквиру истраживања, описани су у **Поглављу 2**.

У другој фази, добијени временски узорак ваљања статистички се анализира како би се одредила вероватноћа нежељеног догађаја са аспекта сигурности брода у олуји (накретања до угла превртања, угла наплављивања кроз незаштићене отворе или неког другог критичног угла). Статистичка анализа закона ваљања и услови под којима је могућа, описани су у **Поглављу 3**. Поступак који чине описане фазе називамо „**пробабилистичком**“ анализом сигурности брода или пробабилистичким приступом стабилитету брода у олуји, у зависности од контекста.

1.2 Примена пробабилистичке анализе у инжењерској пракси

Развој рачунара омогућио је практичну употребу захтевног математичког апарата који се користи у прорачуну кретања брода на таласима и у описивању временских појава важних за сигурност брода. Реч је о (поменутих) нелинеарним диференцијалним једначинама кретања брода и статистичком запису релевантних величина таласа и ветра који делују на брод. У прилици смо да, коришћењем ових алата, тачније предвидимо љуљања брода а затим да, рачуном вероватноће, проценимо ризик – опасност од неке нежељене појаве, нпр. накретања брода до угла превртања. Пробабилистичка анализа сигурности брода (Risk-Based Analysis), неопходан је услов за настанак нових, „пробабилистичких“ прописа о стабилитету брода.

Но, да би се изложена идеја уобличио у нове прописе, требало би утврдити и критеријуме сигурности, тј. ниво дозвољеног ризика. Један од резултата истраживања је и предлог дозвољене вероватноће губитка стабилитета морских и речних бродова у екстремним, али реалним временским условима. Дозвољена (прихватљива) вероватноћа је критеријум на основу којег процењујемо сигурност брода у олуји. Поређењем прорачунате вероватноће превртања или наплављивања са овим критеријумом, узимајући у обзир последице таквог

нежељеног догађаја, процењујемо да ли је ризик прихватљив или не. Дозвољена вероватноћа је осетљива величина коју је тешко прецизно одредити, тако да можемо говорити само о њеном реду величине. Заједно са критеријумом сигурности, пробабилистичка анализа чини основу за развој нових прописа о стабилитету.

Предложени поступак подразумева активан приступ – предвиђање опасности, а не откривање опасности након несрећа – као и мере за повећање сигурности и неутралисање ризика. У том смислу, предложени поступак у складу је са савременим методама за процену сигурности, као што је Formal Safety Assessment (FSA) метода која се, на нивоу ИМО, разматра као средство за доношење одлука и формирање нових прописа у будућности. Допринос истраживања развоју концепта пробабилистичких прописа о стабилитету брода предмет је **Поглавља 3**.

Иако савремени, детерминистички прописи о динамичком стабилитету брода почивају на разумљивим и смисленим претпоставкама, поступци који се у оквиру прописа користе заснивају се на (релативно) грубом опису кретања брода у реалним олујама. То се у првом реду односи на Резолуцију ИМО Скупштине А.562(14), познатију под називом *Критеријум временских услова* (Weather Criterion). Овакав несклад између идеје и њене практичне примене, настао је услед недостатка одговарајућих алата којима би се, на ефикасан и довољно тачан начин, могла проверити сигурност брода (Safety) у реалним временским околностима. Будући да је поступак мењања или доношења нових прописа дуготрајан и сложен, правила нису могла ићи укорак са новим сазнањима о понашању брода на таласима, нити на одговарајући начин одговорити на низ изазова сигурности брода у олуји.

Напокон, у годинама када расте значај транспорта на унутрашњим пловним путевима, јавља се потреба и за повећаном сигурношћу речних бродова. Прописи о стабилитету морских бродова имају своје недостатке, али су бар јединствени и важе на глобалном нивоу. Речну бродоградњу, међутим, карактерише мноштво националних прописа који се према проблему динамичког стабилитета односе неуједначено и поједностављено, па би их требало заменити одговарајућим прописима јединственим за све светске унутрашње пловне путеве. Корак који је у том смислу направљен, кроз Директиву 2006/87/ЕС Европског парламента и Савета, не представља задовољавајуће решење. Упркос уобичајеном уверењу да је динамички стабилитет морских бродова „озбиљније“ питање, истраживање је показало да сигурност речних бродова није занемарљив проблем, нарочито у светлу пораста контејнерског транспорта.

У оквиру истраживања, применом пробабилистичке методе, критички су анализирани постојећи детерминистички прописи: *Критеријум временских услова*, прописи *Југорегистра* о стабилитету бродова унутрашње пловидбе, прописи о стабилитету речних контејнерских бродова из Резолуције 61 Економске комисије Уједињених нација за Европу, али и први пробабилистички прописи који су ушли у употребу – белгијски прописи о сигурности речних бродова намењених обалној

пловидби. Уочени су недостаци и предложене мере за побољшање прописа. Критичка анализа постојећих прописа о стабилитету представљена је у **Поглављу 4**.

Предложени поступак може се користити и за форензичку анализу поморских несрећа. У раду је изложена анализа несреће брода за превоз аутомобила Кугар Ејс (*Cougar Ace*), једне од најзначајнијих поморских несрећа 2006-е године. У анализи овог необичног случаја показане су предности пробабилистичког над класичним приступом динамичком стабилитету. Применом класичног приступа – анализом дијаграма момента стабилитета – не могу се са сигурношћу утврдити узроци несреће, јер се налети ветра и ваљање брода могу само претпоставити. Насупрот томе, применом пробабилистичке анализе можемо реконструисати највероватнији сценарио несреће, јер се ослањамо на својство методе да предвиди кретање брода у било којим задатим временским условима. Могућности примене пробабилистичког приступа при анализи бродолома представљене су у **Поглављу 5**.

Истраживање је дало оригиналан допринос новом инжењерском приступу, тзв. пројектовању на основу ризика (*Risk-Based Ship Design*). Способност пробабилистичке анализе да рангира према сигурности бродове различите форме и димензија, или пак бродове исте форме и основних димензија али различитих карактеристика (метацентарске висине, броја контејнера, висине пражнице, итд.), може се искористити у поступку пројектовања. Појам „оптималне метацентарске висине“ као и дефиниције минималне и максималне метацентарске висине добијене анализом нелинеарног ваљања морског брода, представљају значајан допринос пројектовању на основу сигурности брода у олуји. Предложеним поступком добијају се и неке смернице за пројектовање речних контејнерских бродова: потребна висина пражнице (повезана са висином најнижег незаштићеног отвора) и минимална метацентарска висина. Допринос истраживања пројектовању на основу ризика приказан је у **Поглављу 6**.

Уместо да резултате истраживања изложи хронолошки, аутор се одлучио за другачији (и чини се, тежи) приступ: налази истраживања груписани су тако да објасне потребу за изучавањем и прикажу могућности примене нелинеарног ваљања у бродограђевној пракси. Иако је, следећи овакав приступ, рад подељен на горепоменуте важније целине, понекад је било тешко пронаћи „право“ место одређеним закључцима. Наиме, речено је да се модели нелинеарног ваљања могу користити за развој будућих (пробабилистичких) и критику постојећих (детерминистичких) прописа. Пробабилистички прописи, међутим, својим специфичним захтевима, такође могу утицати на развој и избор одговарајућег модела кретања, а критичка анализа детерминистичких прописа помаже да се уобличи важни концепти нових правила. Анализа несрећа може се искористити за проверу предложених пробабилистичких критеријума и откривање евентуалних недостатака будућих прописа о сигурности. То отежава сваки покушај „разврставања“ резултата, али истовремено потврђује разноврсност примене нелинеарног ваљања брода под дејством ветра и таласа у бродограђевној пракси.

2. Модели нелинеарног ваљања

Уобичајени прорачуни понашања брода на таласима заснивају се на линеарним једначинама кретања изведеним под претпоставком да су кретања мала, а таласи дуги и малог нагиба. Такви математички модели могу са успехом предвидети само љуљања малих амплитуда, што је у већини случајева задовољавајуће кад су у питању нпр. понирање, посртање или закретање. Међутим, ако проучавамо сигурност брода (нпр. тражимо ризик од превртања) у „бочној“ олуји (брод на бочним таласима изложен ударима ветра с бока), очигледно је да нас занимају велики углови накретања. Осим тога, утицај ветра на кретање обично се занемарује, што може бити оправдано само под одређеним околностима. Због тога нам је потребан одговарајући нелинеаран модел ваљања брода под дејством ветра и таласа.

Врло често, нелинеарни модел ваљања заснива се на независној једначини ваљања. Иако је у питању само једна једначина, њена примена у инжењерској пракси захтева сасвим другачији приступ проблему сигурности брода у олуји. С обзиром да постоји више извора нелинеарности, постоје и различити „нивои“ нелинеарности оваквог математичког модела, са чиме су повезани начин и брзина решавања, и врста решења. Независна линеарна једначина користи се нпр. у радовима [2.1], [2.2] и посебно [2.3], где се проблем ризика од превртања детаљно изучава помоћу модела са једним степеном слободе. Модели са више степени слободе примењују се, рецимо, у радовима [2.4], [2.5], [2.6] и [2.7].

У начелу, можемо очекивати да сложенији математички модели (модели са више степени слободе, и са прецизније одређеним члановима једначина) дају тачније резултате. Међутим, имајући у виду да симулације у временском домену захтевају сразмерно много времена за прорачун, избор одговарајућег нелинеарног модела зависи од испитиваног проблема. Осим тога, за разлику од детерминистичких метода, циљ пробабилистичке анализе није „тачна“ вредност угла накретања, већ процена ризика достизања одређеног (критичног) угла накретања. Због тога су, током истраживања, развијени различити модели у складу са анализираним проблемима. У овом раду представљени су модели нелинеарног ваљања морског брода под дејством променљивог бочног ветра и нерегуларних таласа и речног брода под дејством променљивог бочног ветра развијени током

истраживања: модели са једним степеном слободe – независне једначине ваљања, и модели са два степена слободe – спрегнуте једначине ваљања и заношења.

2.1 Модели нелинеарног ваљања са једним степеном слободe

Упркос томе што нам не даје довољно тачна решења, линеарна једначина ваљања је значајна јер представља основу за развој нелинеарне поставке проблема. Уобичајени поступак развоја нелинеарних модела донекле је вештачки и није математички ригорозан [2.3]. Полазећи од опште структуре једначине:

$$(J_x + m_\varphi) \cdot \ddot{\varphi} + M_d(\dot{\varphi}) + M_{st}(\varphi) = \sum M_{exc}(t), \quad (2.1)$$

разматрамо степен нелинеарности појединих чланова и формирамо одговарајући нелинеарни модел. Формалним извођењем нелинеарних једначина добијају се врло компликовани изрази које је тешко анализирати, због чега користимо овако поједностављен, мада одржив приступ [2.3].

Најједноставнији нелинеарни модел коришћен током истраживања представља независна једначина ваљања у којој су одређени чланови једначине (2.1) дати у нелинеарном облику [2.8]. Размотрићемо најпре чланове на левој страни једначине. У општем случају, момент пригушења се састоји из два дела различитог порекла – потенцијалног и вискозног:

$$M_d(\dot{\varphi}) = M_d^{pot} + M_d^{vis}.$$

Потенцијално пригушење је линеарна функција угаоне брзине ваљања и представља последицу таласа које брод ствара љуљањем, због чега се губи део енергије. Други извор губитка енергије представљају трење и други вискозни ефекти. Док је код појединих кретања, нпр. понирања и посртања, вискозни део пригушења занемарљив а потенцијално пригушење је доминантно, код ваљања је ситуација обрнута. Због тога, ако желимо да предвидимо ваљање брода са довољном тачношћу, једначина ваљања треба да садржи одговарајући момент вискозног пригушења. Вискозно пригушење може садржати и линеарни члан, међутим, нелинеарни чланови описују физичке процесе који доводе до пригушења: трење при турбулентном струјању, вртложење, и др. У општем облику, момент вискозног пригушења може се приказати на следећи начин:

$$M_d^{vis} = \alpha \cdot \dot{\varphi} + \beta \cdot \dot{\varphi}^2 + \gamma \cdot \dot{\varphi}^3 + \dots$$

При већим угловима нагиба (обично $> 5^\circ$) крива момента стабилитета има изразито нелинеаран карактер. Уобичајено је да се момент стабилитета апроксимира непарним полиномом вишег степена. Из практичних разлога (да би се поједноставио поступак анализе утицаја метацентарске висине на ваљање), коришћена је подела криве крака стабилитета на крак стабилитета брода са кружним ребрима и крак додатног стабилитета:

$$h(\varphi) = \overline{MG} \cdot \sin \varphi + h'(\varphi).$$

Крак додатног стабилитета зависи од бродске форме и нема аналитички облик, због чега га приказујемо помоћу непарног полинома, често високог степена да би се постигла што већа тачност.

$$h'(\varphi) \approx \sum_{n=0}^N a_{2n+1} \cdot \varphi^{2n+1}.$$

При кретању брода на таласима, распоред хидростатичког притиска по оплати је променљив и другачији него када је брод на мирној води, што се донекле узима у обзир хидромеханичким силама (додатна маса и пригушење при кретању). Због тога није сасвим исправно користити криву крака стабилитета, одређену за брод на мирној води, у једначини ваљања брода на таласима. Ипак, при ваљању уобичајених бродских форми на бочним таласима апроксимација криве крака стабилитета кривом добијеном на мирној води [2.3] је оправдана. Разлике постају суштинске при кретању форми са великим попречним нагибом ребара ка таласима (познати проблем параметарског ваљања великих контејнерских бродова).

У класичним прорачунима, уобичајено је да моменти принудних сила на десној страни једначине садрже само утицај таласа, док се утицај ветра занемарује. Међутим, важан део овог истраживања био је посвећен управо утицају удара ветра на сигурност брода у олуји. Због тога, десна стране једначине (2.1) обухвата принудне моменте како таласа, тако и ветра:

$$\sum M_{exc}(t) = M_{\varphi}(t) + M_w(t).$$

Што се тиче принудног момента који потиче од таласа, у независној једначини ваљања обично се узима дејство тзв. силе Фруд-Крилова:

$$M_{\varphi}(t) = (J_x + m_{\varphi}) \frac{\omega_{\varphi}^2}{g} \sum_{n=1}^N A_n \omega_n^2 \cos(\omega_n t - \varepsilon_n), \quad (2.2)$$

док се ефекти дифракције занемарују. Амплитуде таласа добијају се из одговарајућег спектра таласа:

$$A_n = \sqrt{2S(\omega_n) \cdot d\omega}.$$

У општем случају, момент ветра има облик:

$$M_w(t) = F_w \cdot l_z,$$

где је сила ветра F_w :

$$F_w(v_w) = \frac{1}{2} \rho_a A_w c_w v_w^2. \quad (2.3)$$

Брзина ветра састоји се из константног и променљивог дела, тј. из средње брзине и флукутирајуће компоненте:

$$v_w = \bar{v}_w + v'_w.$$

Средња брзина може се сматрати непроменљивом током временских периода реда величине сата [2.9]. Флукутирајућа компонента може бити метеоролошког или механичког порекла. У граничном слоју (у близини земље, односно водене површине), при већим брзинама ветра, преовладава флукутирајућа компонента механичког порекла која настаје услед храпавости терена на којем се одвија струјање. Са порастом висине, утицај механичког поремећаја струјања опада. Истраживање је показало да је утицај храпавости терена на ваљање брода врло значајан. Због тога се озбиљне недоумице јављају при моделовању утицаја ветра на речни брод, који плови кроз подручја различитог степена храпавости, о чему ће касније бити више речи. Флукутирајућу компоненту брзине добијамо сумирањем амплитуда удара ветра по фреквенцијама:

$$v'_w = \sum_{n=1}^N B_n \omega_n^2 \cos(\omega_n t + \beta_n),$$

при чему амплитуде добијамо из одговарајућег спектра удара ветра:

$$B_n = \sqrt{2S_w(\omega_n) \cdot d\omega}.$$

Током истраживања коришћен је Давенпортов спектар ветра:

$$S_w(\omega) = \frac{4K \cdot \bar{v}_w^2 X_D^2}{\omega(1 + X_D^2)^{\frac{4}{3}}}, \quad X_D = \frac{600\omega}{\pi \cdot \bar{v}_w}. \quad (2.4)$$

Крак момента ветра представља вертикално растојање између нападних тачака силе ветра и силе која се супротставља заносу брода. У раду [2.8] крак момента ветра l_z одређен је као вертикално растојање тежишта надводне и тежишта подводне површине. Одређивање крака момента ветра представља посебан проблем у моделирању дејства ветра. Критеријум временских услова дефинише крак момента ветра као вертикално растојање геометријских тежишта надводне и подводне површине (у недостатку тачног податка, може се сматрати да је тежиште подводне површине на половини газа). Резултати истраживања које је Немачка поднела ИМО поткомитету за стабилитет [2.10] садрже обрасце добијене на основу експерименталних испитивања у аеро-тунелу. Ова испитивања указују да се положај нападне тачке силе ветра значајно мења по висини, у зависности од типа

брода. Резултати експеримената обављених у Јапану [2.11] показују да се нападна тачка дејства подводне силе налази изнад половине газа као и да је њена позиција виша што је однос ширине брода и газа већи. Постоји и другачији приступ. Пошто се брзина ветра састоји из константног и променљивог дела, можемо разликовати статички и динамички део момента ветра којима одговарају различити краци, дефинисани према препорукама из прописа (слика 2.1):

$$M_w(t) = \frac{1}{2} \rho_a A_w c_w I_{st} \cdot \bar{v}_w^2 + \frac{1}{2} \rho_a A_w c_w I_d \cdot v_w' (2\bar{v}_w + v_w'). \quad (2.5)$$

У прорачунима, крак момента ветра често се узима као константна вредност, иако се и површина изложена ветру и крак момента мењају са променом угла нагиба брода. Такав приступ је сасвим оправдан са становишта детерминистичких правила. Међутим, нелинеарни модели ваљања теже реалном опису дејства спољашњих сила, због чега се неки аутори [2.6], [2.7] опредељују за крак момента ветра у функцији угла ваљања.

Према томе, основни математички модел нелинеарног ваљања (у овом случају, независна једначина ваљања) може се написати на више начина. Већ је речено да адекватност одређеног модела зависи од испитиваног проблема. Први у низу модела нелинеарног ваљања који су изложени у овом раду, коришћен је за анализу ИМО Критеријума временских услова са становишта понашања брода на таласима и за испитивање могућности замене Критеријума одговарајућим пробабилистичким прописом [2.8]. (Резултати анализе биће представљени у Поглављу 4.) Да би се успоставила одговарајућа веза између важећег детерминистичког прописа и предложене пробабилистичке алтернативе, задржане су оне претпоставке Критеријума временских услова које можемо сматрати одрживим, што је утицало и на форму појединих чланова нелинеарне једначине ваљања. У складу са тим, крак момента ветра је узет као вертикално растојање геометријских тежишта надводне и подводне латералне површине; укупни момент пригушења састојао од квадратног члана, при чему је константна вредност коефицијента β одређена на основу препорука садржаних у ИМО критеријуму (Метода Јамагате):

$$M_d(\dot{\varphi}) = \beta \cdot \dot{\varphi} |\dot{\varphi}|, \quad \beta \approx \frac{0.5(J_x + m_\varphi)}{(k \cdot X_1 X_2)^2}.$$

Коефицијент додатне масе при ваљању претпостављен је као константна вредност:

$$m_\varphi = 0.1 \cdot J_x.$$

Према томе, први модел нелинеарног ваљања брода под дејством таласа и олујног ветра, коришћен у истраживању, био је формиран на следећи начин:

$$\begin{aligned}
& (J_x + m_\varphi) \cdot \ddot{\varphi} + \beta \cdot \dot{\varphi} |\dot{\varphi}| + gD \left(\overline{MG} \cdot \sin \varphi + \sum_{n=0}^N a_{2n+1} \varphi^{2n+1} \right) = \\
& = (J_x + m_\varphi) \frac{\omega_\varphi^2}{g} \sum_{n=1}^N A_n \omega_n^2 \cos(\omega_n t - \varepsilon_n) + \frac{1}{2} \rho_\sigma A_w c_w l_z \left(\bar{v}_w + \sum_{n=1}^N B_n \omega_n^2 \cos(\omega_n t + \beta_n) \right)^2. \quad (2.6)
\end{aligned}$$

У представљеном истраживању, описани поступак – по први пут – искоришћен је за анализу стабилитета речних бродова у реалним временским приликама. Истовремено са пробабилистичком анализом критеријума динамичког стабилитета морских бродова, у раду [2.8] испитивани су и аналогни прописи Југорегистра који се односе на стабилитет речних бродова у олуји. Анализирано је нелинеарно ваљање речног контејнерског брода изложеног стохастичком дејству бочног ветра. У ту сврху је искоришћен практично исти модел (2.6), у којем је занемарен утицај таласа:

$$\begin{aligned}
& (J_x + m_\varphi) \cdot \ddot{\varphi} + \beta \cdot \dot{\varphi} |\dot{\varphi}| + gD \left(\overline{MG} \cdot \sin \varphi + \sum_{n=0}^N a_{2n+1} \varphi^{2n+1} \right) = \\
& = \frac{1}{2} \rho_\sigma A_w c_w l_z \left(\bar{v}_w + \sum_{n=1}^N B_n \omega_n^2 \cos(\omega_n t + \beta_n) \right)^2. \quad (2.7)
\end{aligned}$$

За потребе наредне анализе нелинеарног ваљања речних контејнерских бродова [2.12], инициране резултатима испитивања добијених у раду [2.8] (о чему ће бити више речи у поглављу 3), формиран је сложенији математички модел. Експериментална испитивања су показала да нелинеарна једначина ваљања која садржи константне хидродинамичке коефицијенте не може предвидети ваљање брода са довољном тачношћу [2.13]. То се у првом реду односи на линеарне и нелинеарне кофицијенте пригушења, који показују јаку зависност од фреквенције ваљања. Због тога су у новом моделу нелинеарног ваљања речног брода вредности хидродинамичких коефицијената додатне масе (тј. додатног момента инерције) и пригушења, прорачунате софтвером [SEAWAY, Amagson b.v.] који се заснива на стрип-теорији, одређене у функцији средње фреквенције ваљања.

Метод Јамагате за одређивање вредности коефицијента пригушења β , коришћен у раду [2.8], развијен је за форме карактеристичне за морске бродове. Даља примена овог метода у моделу ваљања речних бродова који су сасвим другачије форме, деловала је неконзистентно, због чега је усвојен полуемпиријски метод Икеде за одређивање коефицијената момента пригушења [2.14]. Икедин метод узима у обзир напредовање брода, форму трупа и изданке. Применом овог метода добијају се нелинеарни коефицијент пригушења и корекција коефицијента потенцијалног пригушења (услед напредовања брода), па је укупни момент пригушења:

$$M_d(\dot{\varphi}) = \mu \cdot \dot{\varphi} + \beta \cdot \dot{\varphi} |\dot{\varphi}|$$

Коефицијенти μ и β зависе од амплитуде ваљања, која није унапред позната и која у великој мери зависи од пригушења. Због тога се до одговарајућих коефицијената пригушења долазило итеративним поступком; коефицијенти пригушења одређени на основу средње амплитуде ваљања добијене прорачуном коришћени су да би се прорачунала нова вредност средње амплитуде. Васалос и др. користе другачији приступ: коефицијент пригушења се одређује за фреквенцију која одговара спектралном пику, и мења се у складу са променом амплитуде ваљања током симулације у временском домену.

Резултати добијене пробабилистичком анализом упоређени су са правилима за градњу бродова унутрашње пловидбе, која је припремила Радна група за водни саобраћај Комитета за унутрашњи транспорт Економске комисије за Европу Уједињених нација (UNECE) [2.15]. (Ова правила представљају основу прописа садржаних у Директиви 2006/87/ЕС [2.16], мада се Прописи које је усвојио Европски парламент донекле разликују од документа [2.15].) Ради адекватног поређења, као и у претходној анализи, задржане су неке претпоставке садржане у правилима. Момент ветра, као у изразу (2.5), састоји се из статичког и динамичког дела. Према препорукама правила [2.15], крак који одговара статичком делу момента ветра представља растојање геометријских тежишта надводне и подводне латералне површине. Крак динамичког дела момента (момента удара ветра) је вертикално растојање тежишта надводне површине од водне линије брода. Средња брзина ветра је одређена на основу препорука правила [2.15] за зону 2. Амплитуде удара ветра, које чине флукутирајућу компоненту брзине, добијене су из Давенпортовог спектра. Већ је речено да су ови турбулентни поремећаји ваздушног струјања механичког порекла и да настају као последица храпавости терена, што је изражено коефицијентом K . Неке вредности коефицијената храпавости за различита подручја (према [2.17]) дате су у Табели 2.1. Речни бродови пролазе кроз подручја чији се коефицијенти K могу разликовати за ред величине. Прорачун је показао да се, у зависности од изабраног коефицијента храпавости, амплитуде ваљања значајно мењају, што се одражава на процену сигурности брода изложеног ударима бочног ветра.

Табела 2.1: Коефицијенти храпавости терена K

Категорија терена	Опсег	Препоручена вредност
Отворено море. Отворена равница	0.0019 - 0.0028	0.0024
Отворено подручје изван града	0.0033 - 0.0075	0.0047
Ретко насељена градска подручја. Шумовита подручја	0.0075 - 0.030	0.013
Густо насељена градска подручја	0.017 - 0.025	0.022
Центри великих градова	0.014 - 0.022	0.022

У складу са изложеним, математички модел ваљања коришћен у анализи [2.12] био је представљен следећом нелинеарном једначином:

$$\begin{aligned} (J_x + m_\varphi) \cdot \ddot{\varphi} + \mu \cdot \dot{\varphi} + \beta \cdot \varphi |\dot{\varphi}| + gD \left(\overline{MG} \cdot \sin \varphi + \sum_{n=0}^N a_{2n+1} \varphi^{2n+1} \right) = \\ = \frac{1}{2} \rho_a A_w c_w l_{st} \cdot \bar{v}_w^2 + \frac{1}{2} \rho_a A_w c_w l_d \cdot \left(\sum_{n=1}^N B_n \omega_n^2 \cos(\omega_n t + \beta_n) \right) \left(2\bar{v}_w + \sum_{n=1}^N B_n \omega_n^2 \cos(\omega_n t + \beta_n) \right). \end{aligned} \quad (2.8)$$

2.2 Модели нелинеарног ваљања са два степена слободе

У литератури постоји одређен број различитих модела нелинеарног ваљања са више степени слободе. Основне карактеристике најзначајнијих модела биће укратко изложене. Чен и др. [2.5] уводе модел са три степена слободе – спрегнуте диференцијалне једначине ваљања, заношења и понирања у координатном систему везаном за талас. Хидродинамичке силе заношења и понирања су линеарне, док хидродинамички момент ваљања има нелинеаран облик, пошто се момент пригушења ваљања састоји из потенцијалног и вискозног члана. Једначине су изведене за кретање на бочним регуларним таласима. Утицај ветра узима се у обзир, али на сасвим поједностављен начин, преко константног притиска ветра, без удара. Иако полазе од претпоставке да брод врши три спрегнута кретања, аутори тврде да је ваљање доминантно и да утицај заношења и понирања може бити занемарен, због чега се, током решавања, проблем своди само на ваљање.

Кригер и др. [2.4] користе нелинеарну једначину ваљања спрегнутог са заношењем, понирањем, посртањем и закретањем. Момент пригушења је нелинеарног карактера, а момент стабилитета се прорачунава у сваком кораку, узимајући у обзир промену криве крака стабилитета на таласима. Ваљање се прорачунава нумерички, у временском домену. Међутим, само је једначина ваљања нелинеарна, док се остала кретања добијају линеарним прорачуном. Како сами аутори наглашавају, модел је развијен за проблем параметарског ваљања на подужним таласима у крму или прамац (отуда потреба за корекцијом крака стабилитета), и није у стању да прикаже ваљање на бочним таласима са довољном тачношћу.

На основу описаног у [2.6] и [2.7], може се закључити да Васалос и др. користе (линеарне) STF (Салвесен, Так и Фалтинсен) једначине [2.18] у којима је једначина ваљања проширена нелинеарним члановима (иако саме једначине нису дате): моментом стабилитета за велике углове ваљања, моментом пригушења ваљања који садржи нелинеарни члан добијен методом Икеде. Осим сила и момената које потичу од дејства таласа, побудне силе садрже и одговарајуће чланове настале услед дејства променљивог ветра.

Према томе, описани модели са више степени слободе, коришћени у различитим студијама нелинеарног ваљања, свде се заправо на нелинеарну једначину ваљања у којој се утицај других кретања узима посредством линеарних

једначина или се чак занемарује. Нелинеарни облик саме једначине ваљања добијен је проширивањем одређених чланова – извора нелинеарности (крк стабилитета, пригушење ваљања, итд.), одговарајућим нелинеарним изразима, а не формалним извођењем једначине која би описала велика кретања на таласима великог нагиба. Због тога је један од циљева истраживања био модел кретања брода са више степени слободе сачињен од нелинеарних једначина које узимају у обзир утицај релевантних извора нелинеарности и спољашњих сила услед бочних нерегуларних таласа и/или удара бочног ветра.

Најпре је формиран модел спрегнутог ваљања и заношења речног брода изложеног ударима бочног ветра [2.19]. Претпостављено је да се брод ваља и да се слободно заноси. Једначина заношења следи из Другог Њутновог закона:

$$D \cdot \ddot{\eta} = -F_{hyd}(\dot{\eta}, \ddot{\eta}, \dot{\phi}, \ddot{\phi}) + F_w(v_{wrel}) - F_s(\dot{\eta}),$$

где је хидродинамичка сила F_{hyd} последица заношења брода и спрезања заношења са ваљањем:

$$F_{hyd} = n_{\eta} \cdot \dot{\eta} + m_{\eta} \cdot \ddot{\eta} + n_{\eta\phi} \cdot \dot{\phi} + m_{\eta\phi} \cdot \ddot{\phi}.$$

Сила ветра је дата изразом (2.3), у којем фигурише релативна брзина ветра у односу на брод:

$$v_{wrel} = \bar{v}_w - \dot{\eta} + v'_w.$$

Заношењу брода супротставља се нелинеарна сила отпора воде:

$$F_s(\dot{\eta}) = \frac{1}{2} \rho A_s c_s \dot{\eta} |\dot{\eta}|.$$

С друге стране, једначина ваљања проистиче из закона о промени момента количине кретања:

$$J_x \cdot \ddot{\phi} = -M_{hyd}(\dot{\eta}, \ddot{\eta}, \dot{\phi}, \ddot{\phi}) - M_{st} + M_w(v_{wrel}) - M_s(\dot{\eta}),$$

где је момент хидродинамичких сила:

$$M_{hyd} = M_d(\dot{\phi}) + m_{\phi} \cdot \ddot{\phi} + n_{\phi\eta} \cdot \dot{\eta} + m_{\phi\eta} \cdot \ddot{\eta},$$

нелинеарног карактера, пошто момент пригушења ваљања, поред потенцијалног пригушења и корекције тог пригушења услед напредовања брода, обухвата и нелинеарно, вискозно пригушење:

$$M_d(\dot{\varphi}) = (n_\varphi + \mu) \cdot \dot{\varphi} + \beta \cdot \dot{\varphi} |\dot{\varphi}|.$$

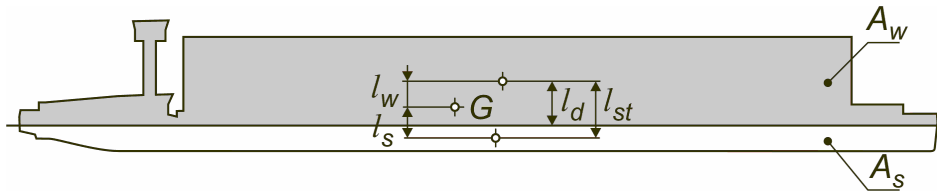
Корекција коефицијента потенцијалног пригушења и коефицијент нелинеарног пригушења одређени су методом Икеде. Важи симетрија хидродинамичких коефицијента додатне масе и пригушења:

$$n_{\varphi\eta} = n_{\eta\varphi}, \quad m_{\varphi\eta} = m_{\eta\varphi}.$$

Крак момента ветра l_w је вертикално растојање тежишта надводне латералне површине и тежишта брода, а крак момента који одговара сили отпора заносу l_s је вертикално растојање тежишта латералне подводне површине од тежишта брода (сл. 2.1). Момент који одговара сили отпора заносу је:

$$M_s = F_s \cdot l_s.$$

Подсећања ради, код модела са једним степеном слободe (независна једначина ваљања брода у којој је занемарено заносу као и било које друго кретање), тачан крак момента ветра није познат, због чега се користе приближни обрасци за момент, нпр. (2.5).



слика 2.1: Кракови момената спољашњих сила, коришћени у прорачунима

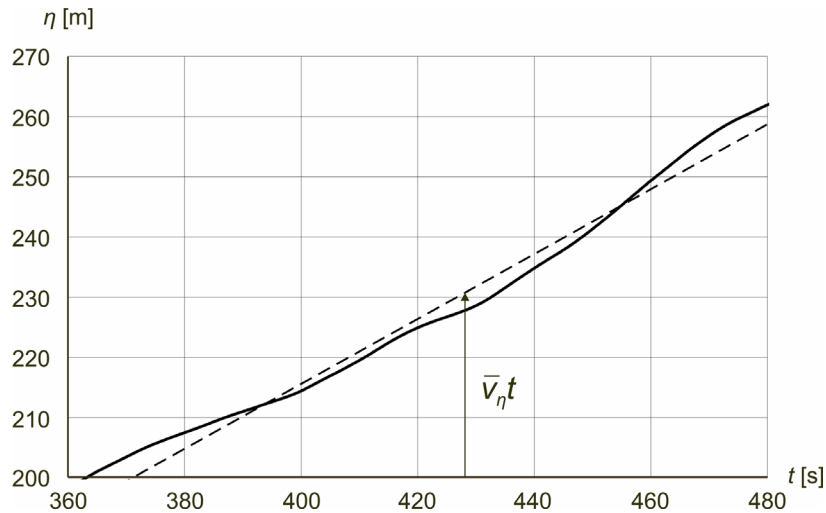
Након замене одговарајућих израза у полазне једначине заносу и ваљања, добија се један од модела са два степена слободe коришћених у раду [2.19]:

$$\left. \begin{aligned} (D + m_\eta) \cdot \ddot{\eta} + n_\eta \cdot \dot{\eta} + n_{\eta\varphi} \cdot \dot{\varphi} + m_{\eta\varphi} \cdot \ddot{\varphi} &= \\ &= \frac{1}{2} \rho_\sigma A_w c_w \cdot \left(\bar{v}_w - \dot{\eta} + \sum_{n=1}^N B_n \omega_n^2 \cos(\omega_n t + \beta_n) \right)^2 + \frac{1}{2} \rho A_s c_s \dot{\eta} |\dot{\eta}| \\ (J_x + m_\varphi) \cdot \ddot{\varphi} + (n_\varphi + \mu) \cdot \dot{\varphi} + \beta \cdot \dot{\varphi} |\dot{\varphi}| + n_{\varphi\eta} \cdot \dot{\eta} + m_{\varphi\eta} \cdot \ddot{\eta} + gD \left(\overline{MG} \cdot \sin \varphi + \sum_{n=0}^N a_{2n+1} \varphi^{2n+1} \right) &= \\ &= \frac{1}{2} \rho_\sigma A_w c_w l_w \cdot \left(\bar{v}_w - \dot{\eta} + \sum_{n=1}^N B_n \omega_n^2 \cos(\omega_n t + \beta_n) \right)^2 + \frac{1}{2} \rho A_s c_s l_s \cdot \dot{\eta} |\dot{\eta}| \end{aligned} \right\} (2.9)$$

Решење модела представљају заносу и ваљање брода током времена $\eta(t)$, $\varphi(t)$. Описани модел претпоставља да се брод потпуно слободно заноси под дејством

ветра чија брзина осцилује око константне вредности, због чега закон заносења има линеарно променљив и осцилујући део (сл. 2.2):

$$\eta(t) = \bar{v}_\eta \cdot t + \eta'(t).$$



слика 2.2: Закон заносења добијен решавањем модела кретања брода који се слободно заноси

Међутим, није реално претпоставити да ће се брод са исправним пропулзивним комплексом сасвим слободно заносити. У случају ограниченог пловног пута, тј. речног тока одређене ширине, то није ни могуће. Капетан ће настојати да поништи константну брзину заносења и тако задржи брод на (средњем) курсу. Појам „брода на курсу“ у датој анализи користи се у контексту другачијем од уобичајеног, пошто моделом (2.9) није предвиђено закретање брода. Да би се заносење брода свело на осциловање око средње трајекторије, на брод треба деловати константном бочном силом интензитета:

$$\bar{F}_s = \frac{1}{2} \rho A_s c_s \bar{v}^2,$$

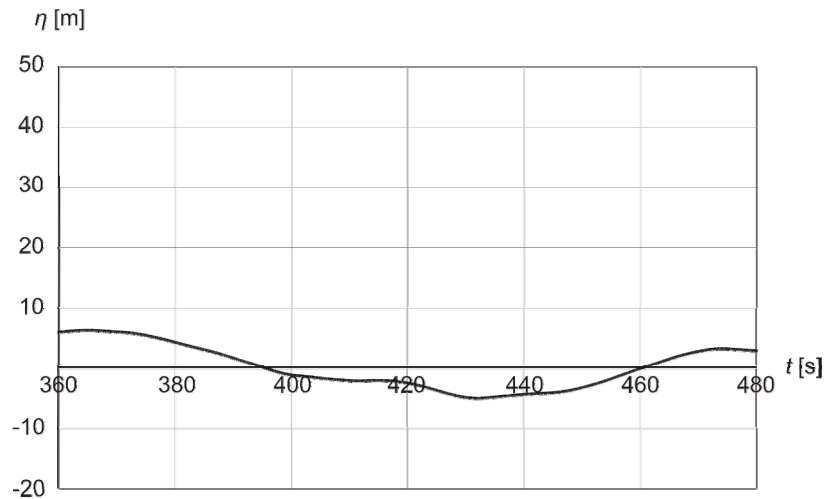
којој одговара константан момент:

$$\bar{M}_s = \frac{1}{2} \rho A_s c_s \bar{v}^2 l_s,$$

где је брзина \bar{v} свега неколико процената већа од брзине којом би се заносио брод, изложен ветру константне брзине. Тако је добијен други модел са два степена слободе коришћен у студији [2.19], означен као модел „држања брода на курсу“:

$$\left. \begin{aligned}
 (D + m_\eta) \cdot \ddot{\eta} + n_\eta \cdot \dot{\eta} + n_{\eta\varphi} \cdot \dot{\varphi} + m_{\eta\varphi} \cdot \ddot{\varphi} = \\
 = \frac{1}{2} \rho_a A_w c_w \cdot \left(\bar{v}_w - \dot{\eta} + \sum_{n=1}^N B_n \omega_n^2 \cos(\omega_n t + \beta_n) \right)^2 + \frac{1}{2} \rho A_s c_s \dot{\eta} |\dot{\eta}| - \frac{1}{2} \rho A_s c_s \bar{v}^2 \\
 (J_x + m_j) \cdot \ddot{\varphi} + (n_\varphi + \mu) \cdot \dot{\varphi} + \beta \cdot \dot{\varphi} |\dot{\varphi}| + n_{\varphi\eta} \cdot \dot{\eta} + m_{\varphi\eta} \cdot \ddot{\eta} + gD \left(\overline{MG} \cdot \sin \varphi + \sum_{n=0}^N a_{2n+1} \varphi^{2n+1} \right) = \\
 = \frac{1}{2} \rho_a A_w c_w l_w \cdot \left(\bar{v}_w - \dot{\eta} + \sum_{n=1}^N B_n \omega_n^2 \cos(\omega_n t + \beta_n) \right)^2 + \frac{1}{2} \rho A_s c_s l_s \cdot \dot{\eta} |\dot{\eta}| + \frac{1}{2} \rho A_s c_s l_s \cdot \bar{v}^2.
 \end{aligned} \right\} (2.10)$$

Заношење и ваљање добијени решавањем модела који садржи додатну силу „држања брода на курсу“ и одговарајући момент, разликују се од решења добијених под претпоставком да се брод слободно заноси. Осим што се заношење своди на флукутирајући компоненту (сл. 2.3), мења се и средња амплитуда ваљања брода.



слика 2.3: Закон заношења добијен решавањем модела кретања „брода на курсу“

Веома је занимљиво поређење закона ваљања, добијеног решавањем описаних модела са два степена слободe, са решењем које се добија независном једначином ваљања (сл. 2.4). Може се закључити да модел са једним степеном слободe даје веће углове ваљања, односно да се ваљање брода којем је допуштено заношење, смањује. Поред тога, брод који се слободно заноси, ваља се мање од брода који је приморан да остане на курсу.

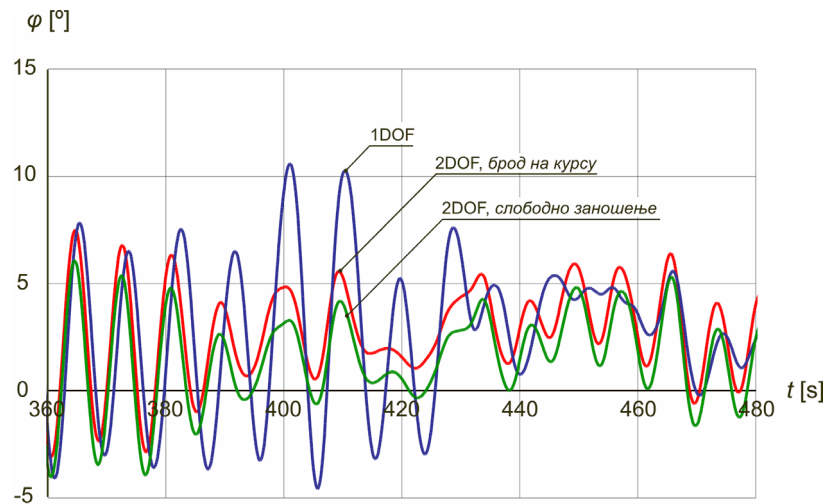
Разлика између модела са једним степеном слободe (2.8) и модела са два степена слободe (2.9) и (2.10) може се приказати и у фреквенцијском домену. Слика 2.5 приказује преносне функције нелинеарног ваљања брода, испитиваног у студији [2.19], под дејством стохастички променљивог ветра. Преносне функције представљене су односом:

$$f_{\varphi n} = \frac{\varphi_n}{\alpha_n},$$

где је φ_n амплитуда ваљања, а α_n бездимензиони коефицијент сразмеран амплитуди удара ветра:

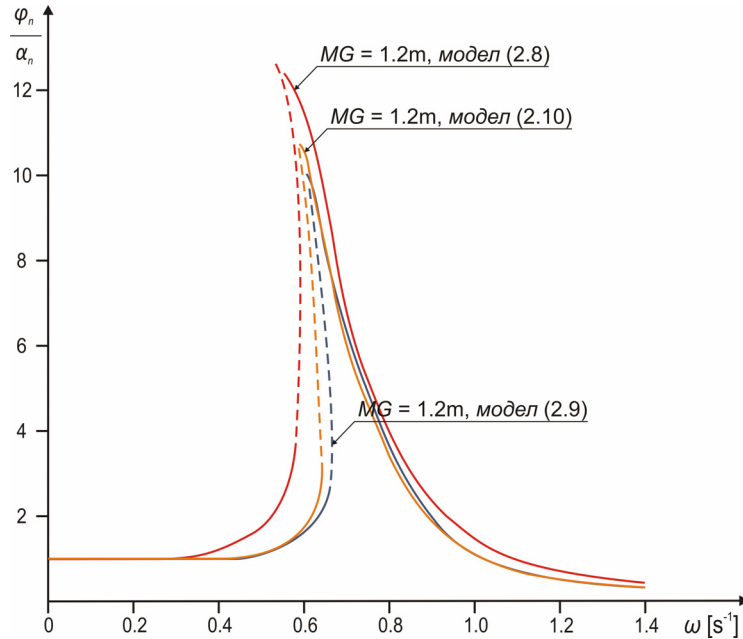
$$\alpha_n = \frac{\rho_a A_w c_w \cdot \bar{v}_w \cdot I_d}{gD \cdot MG} \cdot v_n.$$

Приказане преносне функције добијене су под претпоставком да је $\alpha_n = 0.042$. Преносне функције имају „закривљени“ пик, карактеристичан за нелинеарна осцилаторна кретања (видети нпр. [2.3]). Очигледно, резонантни пикови добијени помоћу модела са два степена слободе значајно су нижи од пика који одговара ваљању моделованом једном независном једначином. То, међутим, није једина (и најважнија) разлика између модела: критичне области ваљања које одговарају моделима са два степена слободе приметно су уже. Померање почетка критичне зоне ка вишим фреквенцијама чини се као најважнији разлог за смањење амплитуда ваљања добијених помоћу модела са два степена слободе.



слика 2.4: Поређење нелинеарних модела ваљања речног брода у временском домену

Као што је већ речено, подразумевамо да модели са два степена слободе реалније описују кретање брода у бочној олуји. Осим тога, модел (2.10) боље одговара стварним условима пловидбе, због чега се може сматрати „најбољим“ међу испитиваним моделима (2.7), (2.8), (2.9) и (2.10). С обзиром на поменућу разлику у резултатима добијеним помоћу модела (2.9) и (2.10), избор модела је, у сваком случају, у складу са инжењерским приступом да резултат анализе треба да остане на страни сигурности.



слика 2.5: Поређење нелинеарних модела ваљања речног брода у фреквенцијском домену

Истраживањем је обухваћен и развој модела кретања са два степена слободе морског брода у бочној олуји. У том циљу, модел (2.9) употпуњен је принудним силама и моментима који потичу од дејства таласа и то силама Фруд-Крилова:

$$F_{\eta}^{FK} = -D \sum_{n=1}^N \omega_n^2 B_n \cos(\omega_n t - \varepsilon_{\eta n}),$$

и дифракције:

$$F_{\eta}^D = -m_{\eta} \sum_{n=1}^N \omega_n^2 B_n \cos(\omega_n t - \varepsilon_{\eta n}),$$

као и одговарајућим моментима:

$$M_{\varphi}^{FK} = (J_x + m_{\varphi}) \frac{\omega_{\varphi}^2}{g} \sum_{n=1}^N \omega_n^2 B_n \cos(\omega_n t - \varepsilon_{\varphi n}),$$

$$M_{\varphi}^D = -m_{\varphi n} \sum_{n=1}^N \omega_n^2 B_n \cos(\omega_n t - \varepsilon_{\varphi n}) - \overline{OG} \cdot m_{\eta} \sum_{n=1}^N \omega_n^2 B_n \cos(\omega_n t - \varepsilon_{\eta n}).$$

Тако се добија модел нелинеарног ваљања спрегнутог са заношењем, који је коришћен за испитивање сигурности бродова за приобалну пловидбу:

$$\left. \begin{aligned}
& (D + m_\eta) \cdot \ddot{\eta} + n_\eta \cdot \dot{\eta} + n_{\eta\varphi} \cdot \dot{\varphi} + m_{\eta\varphi} \cdot \ddot{\varphi} = \\
& \quad = \frac{1}{2} \rho_a A_w c_w \cdot \left(\bar{v}_w - \dot{\eta} + \sum_{n=1}^N B_n \omega_n^2 \cos(\omega_n t + \beta_n) \right)^2 - \frac{1}{2} \rho A_s c_s \dot{\eta} |\dot{\eta}| - \\
& \quad \quad - (D + m_\eta) \cdot \sum_{n=1}^N A_n \omega_n^2 \cos(\omega_n t - \varepsilon_{n\eta}) \\
& (J_x + m_\varphi) \cdot \ddot{\varphi} + (n_\varphi + \mu) \cdot \dot{\varphi} + \beta \cdot \dot{\varphi} |\dot{\varphi}| + n_{\varphi\eta} \cdot \dot{\eta} + m_{\varphi\eta} \cdot \ddot{\eta} + gD \left(\overline{MG} \cdot \sin \varphi + \sum_{n=0}^N a_{2n+1} \varphi^{2n+1} \right) = \\
& \quad = (J_x + m_\varphi) \cdot \frac{\omega_\varphi^2}{g} \sum_{n=1}^N A_n \omega_n^2 \cos(\omega_n t - \varepsilon_{n\varphi}) - m_{\varphi\eta} \cdot \sum_{n=1}^N A_n \omega_n^2 \cos(\omega_n t - \varepsilon_{n\varphi}) \\
& \quad \quad - \overline{OG} \cdot m_\eta \cdot \sum_{n=1}^N A_n \omega_n^2 \cos(\omega_n t - \varepsilon_{n\eta}) - \\
& \quad \quad - \frac{1}{2} \rho_a A_w c_w l_w \cdot \left(\bar{v}_w - \dot{\eta} + \sum_{n=1}^N B_n \omega_n^2 \cos(\omega_n t + \beta_n) \right)^2 - \frac{1}{2} \rho A_s c_s l_s \cdot \dot{\eta} |\dot{\eta}|.
\end{aligned} \right\} (2.11)$$

Модел (2.11) ипак треба сматрати само прелазним кораком ка потпунијем моделу ваљања на таласима са више степени слободе. При великим угловима ваљања на таласима, долази до спрезања ваљања са понирањем. Потпуни модел кретања брода изложеног истовременом дејству нерегуларних бочних таласа и променљивог бочног ветра, осим ваљања и занешења требало би, због тога, да обухвати и понирање и закретање. Да би се добио такав модел, међутим, неопходно је формално извођење нелинеарних спрегнутих једначина љуљања брода, а не интуитивни поступак проширивања линеарних једначина нелинеарним члановима, који је примењен у овом истраживању.

2.3 Литература

- 2.1 Bulian, G., Francescutto, A., "A Simplified Modular Approach for the Prediction of the Roll Motion due to the Combined Action of Wind and Waves", Proceedings Inst. Mech. Eng. Vol. 218, Part M, Journal of Eng. for the Maritime Environment 2004, pp. 189-212.
- 2.2 Belenky, V. L., Degtyarev A. B., Boukhanovsky A. V., "Probabilistic Qualities of Nonlinear Stochastic Rolling", Ocean Engineering Vol. 25, No. 1, 1998, pp. 1-25.
- 2.3 Belenky, V.L., Sevastianov, N.B., "Stability and Safety of Ships – Risk of Capsizing", The Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), 2007
- 2.4 Krueger S., Kluwe F., "Development of Dynamic Stability Criteria from Direct Seakeeping Simulations", The International Marine Design Conference 2006, Ann Arbor, Michigan USA, 2006
- 2.5 Chen S., Shaw S. W., Troesch A. W., "A Systematic Approach to Modeling Multi-DOF Ship Motions in Regular Seas", Journal of Ship Research, Vol. 43, No. 1, March 1999, pp. 25-37.
- 2.6 Vassalos, D., Jasionowski, A., Cichowicz, J., "Issues Related to the Weather Criterion", International Shipbuilding Progress, 51. no. 2/3, 2004, pp. 251-271.
- 2.7 Vassalos, D., Jasionowski, A., Cichowicz, J., "Weather Criterion – Questions and Answers", Proc. 8th STAB, Madrid, 2003, pp. 695-705.
- 2.8 Hofman M., Bačkalov I., "Weather Criterion for Seagoing and Inland Vessels – Some New Proposals", Proceedings of International Conference on Marine Research and Transportation, 8 '05, University of Naples "Federico II", 2005, pp. 53-62.
- 2.9 Stathopoulos T., "Introduction to Wind Engineering – Wind Structure", International Advanced Professional Training "Wind Effects on Buildings and Design of Wind-Sensitive Structures", International Center for Mechanical Sciences (CISM), Udine, September 2006.
- 2.10 "Review of the Intact Stability Code – Sample Calculations Using a Wind Criterion", Submitted by Germany, IMO Sub-Committee on Stability and Load Lines and on Fishing Vessels Safety, 46th Session, Agenda Item 6, 3 July 2003.
- 2.11 "Review of the Intact Stability Code – Comments on Draft Guidelines for Alternative Assessment of Weather Criterion Based on Trial Experiment Results", Submitted by Japan, IMO Sub-Committee on Stability and Load Lines and on Fishing Vessels Safety, 48th Session, Agenda Item 4, 8 July 2005.
- 2.12 Hofman M., Maksić I., Bačkalov I., "Some Disturbing Aspects of Inland Vessel Stability Rules", Journal of Ship Technology, New Delhi, Vol. 2, No. 2, July 2006, pp 1-14.

- 2.13 Contento G., Francescutto A., Piciullo M., “On the Effectiveness of Constant Coefficients Roll Motion Equation”, *Ocean Engineering* Vol. 23, No. 7, 1996, pp. 597-618.
- 2.14 Himeno, Y., “Prediction of Ship Roll Damping – State of the Art” Report No. 239, College of Engineering, University of Michigan, 1981.
- 2.15 United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), Inland Transport Committee, Working Party on Inland Water Transport, “Recommendations on Harmonized Europe-Wide Technical Requirements for Inland Navigation Vessels (Resolution No. 61)”, March 2006.
- 2.16 Directive of the European Parliament and of the Council, laying down technical requirements for inland waterway vessels (2006/87/EC), *Official Journal of European Union*, 12 December 2006.
- 2.17 Lungu D., Rackwitz R., Joint Committee on Structural Safety Probabilistic Model Code, Section 2.13, Wind, Part 2, Loads, 1996.
- 2.18 Salvesen N., Tuck E.O., Faltinsen O., “Ship Motions and Sea Loads”, *The Society of Naval Architects and Marine Engineers*, Vol. 78, 1970.
- 2.19 Bačkalov I., Kalajdžić M., Hofman M., “Inland Vessel Rolling due to Severe Beam Wind: a Step towards a Realistic Model”, *Probabilistic Engineering Mechanics* (2009), <http://dx.doi.org/10.1016/j.probengmech.2009.05.003>

3. Развој пробабилистичких прописа

Ризик (*riscium*, ριζικόν) је термин који се од Средњег века везује за поморски саобраћај, али тек последњих година налази место у прописима о сигурности пловидбе. Ризик **R** дефинише се као комбинација учесталости догађаја (несреће) и озбиљности последица несреће по сигурност брода [3.1], тј. као заједничка мера вероватноће нежељеног догађаја **P** (hazard probability) и последице тог догађаја **S** (hazard severity) [3.2]:

$$R = P \cdot S$$

Да би ризик могао бити означен на одговарајући начин (као „велики“, „мали“, „недопустив“, „занемарљив“ и сл.) треба проценити последице и учестаност несреће. Дефиниција ризика подразумева да нпр. ризик од превртања, осим вероватноће да ће доћи до превртања **P**, садржи и квантитативну меру опасности по људске животе и животну средину **S**. У поступку процене ризика (risk assessment) вероватноћу догађаја (несреће) треба доделити одговарајућим последицама догађаја. Процена последица несреће је сложено питање које зависи од више различитих параметара (смртност, перцепција несреће у друштву, економска штета, итд.). Процена фактора **S** није била предмет овог истраживања. С друге стране, прорачун нелинеарног кретања брода на таласима и статистичка анализа омогућавају процену вероватноће несреће – губитка стабилитета у неповољним временским условима, што представља једну од основних тема овог истраживања.

Промена угла ваљања током времена може се, под одређеним условима, статистички анализирати како би се одредила вероватноћа достизања угла ваљања критичног за сигурност брода (вероватноћа несреће). Критични угао ваљања може бити угао превртања или наплављивања незаштићених отвора или максимални угао накретања (обично 50° код морских бродова и 15° код речних бродова). Прорачунату вероватноћу да ће се несрећа десити током одређеног временског периода треба упоредити са неким критеријумом, тј. дозвољеном или прихватљивом вероватноћом догађаја. Одговарајући критеријуми, заједно са алатима за прорачун кретања брода (адекватним моделом нелинеарног ваљања, о чему је било речи у претходном Поглављу) и статистичку анализу кретања, чине

основу за развој нових, пробабилистичких прописа о (динамичком) стабилитету брода.

Истраживање представљено у овом раду даје сопствени допринос развоју пробабилистичких прописа. Да би се сагледало место добијених резултата, неопходно је направити кратак преглед напретка постигнутог на пољу развоја прописа током последњих година. Наиме, ИМО, класификациона друштва, државна регулаторна тела, различити истраживачки тимови и друге заинтересоване стране интензивно раде на развоју нових прописа о сигурности бродова. Будући прописи суштински се разликују по приступу проблему сигурности од класичних правила и критеријума. Иако се резултати овог истраживања односе на прописе о динамичком стабилитету при кретању брода у бочној олуји, треба напоменути да је термин „сигурност“ (safety) намерно коришћен на многим местима у тексту (сасвим у складу са терминологијом у релевантној литератури), управо због своје свеобухватности, како би се назначио правац у којем се креће развој прописа.

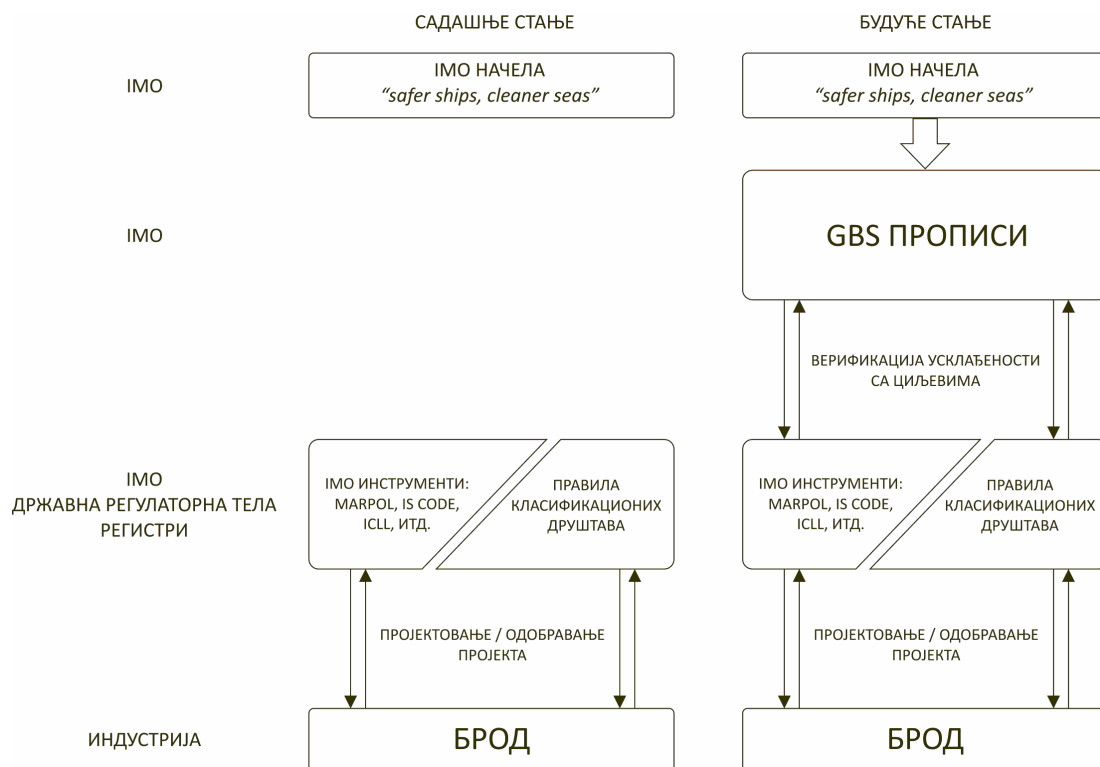
3.1 Развој прописа заснованих на постављеном циљу (Goal-based Standards)

Без обзира на принципе на којима се заснивају, прописи имају исте циљеве: сигурност брода, терета, посаде и путника. Нпр. превртање брода је фатални догађај, неприхватљив са становишта сигурности, због чега прописи без разлике настоје да га спрече. Међутим, прописи се могу разликовати према начину на који спречавају да дође до превртања брода. У том смислу, класичне детерминистичке прописе, као што су ИМО критеријуми о стабилитету неоштећеног брода, чини скуп одредби које морају бити задовољене како би се спречило превртање, при чему се (често) не види непосредна веза између нежељеног догађаја и самих прописа. Очигледно, будући да су детерминистички прописи засновани на искуству тј. на важећој „доброј бродограђевној пракси“ у тренутку писања правила, они не могу обухватити са једнаким успехом различитости у пројектовању које утичу на сигурност [3.3]. Другим речима, детерминистичка правила фокусирана су само на одређене аспекте пројектовања, због чега не успевају да обезбеде довољну сигурност у случајевима када су неки други параметри од већег значаја, или пак намећу непотребна ограничења у пројектовању. Због тога се јавила потреба за другачијим прописима који би били у стању да обезбеде постављени циљ – одговарајућу сигурност у пловидби свим бродовима (који улазе у опсег разматрања досадашњих прописа), не намећући специфична решења у форми, конструкцији и сл. Изложени приступ чини окосницу прописа који се означавају као стандарди засновани на предвиђеном циљу (Goal-based Standards, GBS). GBS прописи се руководе принципом „еквивалентне сигурности“ (safety equivalence), која пројектанту даје „одрешене руке“ уз услов да задовољи предвиђени циљ. ИМО комитет за сигурност пловидбе MSC (Marine Safety Committee) постепено уводи у употребу GBS прописе кроз ревизију важећих (SOLAS) и формирање сасвим нових докумената (IMO goal-based new ship construction standards), али (још увек) не постоје специфичне процедуре које се односе на динамички стабилитет бродова.

ИМО настоји да GBS прописи имају интегрални карактер, тј. да јединственим правилима обухвате све могуће узроке несрећа (тзв. „холистички“, целовит приступ сигурности). Циљеви прописа (goals) дефинисани су на следећи начин:

„Бродови треба да буду пројектовани и изграђени тако да, током предвиђеног радног века буду сигурни, и прихватљиви са становишта заштите животне средине, у неоштећеном и одређеним стањима оштећења, ако се њима управља и ако се одржавају на одговарајући начин у одређеним радним условима.“

Дакле, осим уобичајених захтева да бродови имају одговарајућу чврстоћу и стабилитет (током предвиђеног радног века не мањег од 25 година, у условима дефинисаним дугорочним статистичким подацима који одговарају Северном Атлантику), прописи треба да обухвате и ризике изазване људским грешкама, лошим одлукама и нестручним управљањем [3.4]. Овакав приступ у складу је са статистичким подацима који показују да је свега 20-30% поморских несрећа последица недостатака у пројектовању, механичког квара или лома и сл. [3.5].



слика 3.1: Хијерархија прописа у бродоградњи – садашње и будуће стање (према [3.6])

ИМО жели да развојем GBS прописа успостави регулативни оквир, тј. структуру будућих прописа. GBS прописи су хијерархијски вишег реда у односу на правила регистара или државних регулаторних тела (слика 3.1), али ИМО не жели да преузме обавезе класификационих друштава, нити да пропише техничке детаље пројектовања и градње. Дакле, бродови морају задовољити одређене циљеве, али

је начин постизања тих циљева предмет рада пројектних бироа, бродоградилшта и класификационих друштава. У том смислу, GBS стандарди су од великог значаја јер стварају простор за непосредну примену иновативних метода за проверу сигурности, каква је пробабилистичка анализа стабилитета брода у олуји, настала током овог истраживања.

3.2 Сигурност заснована на процени ризика. SAFEDOR пројект

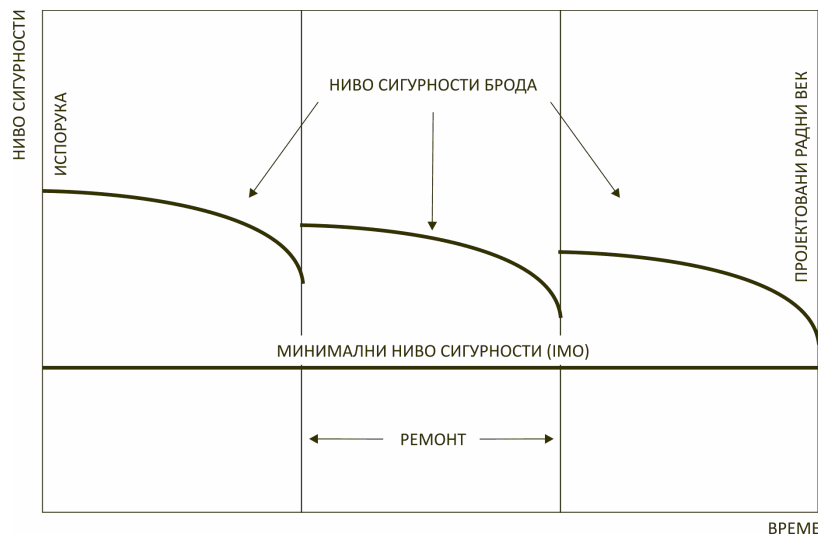
Да би се брод могао сматрати сигурним (у складу са GBS прописима), потребно је утврдити (квантификовану) меру сигурности. Један од начина да се то постигне је анализа ризика. Треба одредити прихватљив ниво ризика и дефинисати процедуру процене ризика.

Упркос јасним принципима на којима се темеље, GBS прописи су веома комплексни, због чега се намеће низ питања везаних за свакодневну примену у бродограђевној пракси. То се првенствено односи на процедуру за процену сигурности алтернативних пројектних решења. ИМО сугерише принцип еквивалентне сигурности који подразумева да степен сигурности остварен алтернативним решењем (пројектом) није мањи од оног који се постиже решењем добијеним применом детерминистичких правила [3.7]. Другим речима, постојећи брод који се сматра сигурним представља „еталон“ сигурности. Међутим, истраживање је показало да различити бродови, иако задовољавају детерминистичке ИМО критеријуме о стабилитету, могу имати веома различите вероватноће превртања: од $O(10^{-2})$ до $O(10^{-5})$. Слични резултати добијени су и другим истраживањима. Беленки [3.2] је испитивао вероватноћу превртања 17 бродова у три стања крцања. Сваки од бродова је задовољавао ИМО критеријуме о стабилитету, али су се вероватноће превртања бродова разликовале за чак 7 редова величина. Због тога се инхерентна сигурност пројекта изведеног у складу са детерминистичким правилима, бар у случају стабилитета, не може сматрати „апсолутном“.

У оквиру SAFEDOR² пројекта предложен је другачији приступ, заснован на процени ризика (risk-based approach). Разматрања која су ИМО комитету за сигурност морске пловидбе поднеле Данска и Норвешка [3.8], садрже концепт „минималне сигурности“ или „максималног прихватљивог ризика“ који комбинује ризике услед неког великог оштећења (колапса) конструкције, превртања, пожара и других несрећа са фаталним последицама, на годишњем нивоу. Сви бродови, без обзира на старост, требало би да задовоље минимални ниво сигурности који би прописао ИМО (слика 3.2).

² SAFEDOR (Design, Operation and Regulation for Safety) пројект (2005–2009) је најопсежније европско истраживање сигурности бродова. Пројект је био део Шестог оквирног програма (FP6) који се финансира средствима Европске Уније. У пројекту су учествовала класификациона друштва, бродарски институти, универзитети, бродарске компаније, бродоградилшта, специјализоване софтверске компаније и др.

Постоји више принципа на основу којих се може одредити ниво прихватљивог ризика. Најпознатији су: принцип апсолутног ризика, ALARP (As Low As Reasonably Practicable) принцип, холистички принцип и др. а често се користи комбинација више принципа. Ниво ризика обично се приказује помоћу матрица ризика, F-N кривих (које повезују број жртава са учестаношћу несрећа) и ALARP дијаграма. У оквиру SAFEDOR пројекта, применом FSA (Formal Safety Assessment) методе анализирана је сигурност танкера, LNG, RoPax, контејнерских и путничких бродова. (FSA метода није резултат SAFEDOR пројекта; IMO је „препознао“ FSA као алат за развој будућих прописа још 1997. [3.9].) FSA приступ користи расположиву статистику о несрећама и састоји се из више фаза: 1. препознавања опасности – узрока несрећа карактеристичних за разматрани тип брода (HAZID – hazard identification), 2. анализе ризика, 3. препознавања мера за контролу ризика, 4. економске “cost-benefit” анализе мера за контролу ризика и 5. препорука на основу “cost-benefit” анализе. Процењени су нивои индивидуалног ризика за чланове посаде и путнике, као и нивои „друштвеног“ ризика (societal risk) које сноси цела посада или друштво у целини³, услед идентификованих узрочника несрећа, на годишњем нивоу. Добијени нивои ризика упоређени су са прихватљивим ризиком, према подацима британске агенције Health and Safety Executive (видети нпр. [3.11]).



слика 3.2: Приступ сигурности брода заснован на ризику – SAFEDOR пројект (према [3.8])

Постојећа методологија, међутим, заснива се углавном на ризику губитка људског живота, због чега је тешко повезати са стварном опасношћу и последицама несреће брода у олуји. Наиме, иако је превртање брода неприхватљив догађај (због могућег губитка брода, терета, загађења животне средине), оно не мора бити

³ „Друштвени“ ризик користи се за процену ризика у несрећама које погађају велики број људи. Друштвени ризик може да се одреди за сваки тип несреће понаособ, или „укупно“, за све идентификоване несреће једног типа бродова [10].

повезано са губитком (великог броја) људских живота. Осим тога, да би се проценила сигурност одређеног типа бродова, FSA метода примењена је на тзв. „генерички“ брод који се сматра добрим узорком, нпр. целокупна флота контејнерских бродова, подељена у шест категорија просечне носивости од 300 до 5600 TEU (3875 бродова у јануару 2007.) представљена је помоћу свега два генеричка брода. Посебан проблем FSA студија урађених у оквиру SAFEDOR пројекта (као и већине FSA студија уопште) представља ослањање на статистичке податке о несрећама. Наиме, поред тога што могу садржати непоуздане податке и што често нису доследно организоване, постојеће базе података, по природи ствари, обухватају само познате ризике али не успевају да предвиде ризике карактеристичне за будуће, или чак савремене бродове [3.12], [3.13]. Следећи искуства из прошлости, овакве студије долазе у опасност да, без намере, слично детерминистичким прописима, будуће прописе заснују на „доброј бродограђевној пракси“.

3.3 Пробабилитички прописи о динамичком стабилитету брода

Термин „сигурност“ до сада је коришћен како би се нагласило холистичко опредељење у стварању нових прописа. Потребна су обимна истраживања у будућем периоду да би холистички приступ био примењив. У међувремену, потребно је побољшати постојеће прописе који се односе на поједине аспекте сигурности брода, као што је стабилитет. Постојећи прописи о стабилитету (неоштећеног брода) имају детерминистички карактер. Упркос опсежним истраживањима у домену развоја нових правила, ИМО поткомитет за стабилитет, који ради на побољшању прописа, наставља да се ослања на детерминистички приступ [3.5]. Важећа правила о стабилитету бродова унутрашње пловидбе (прихваћена на свим европским унутрашњим пловним путевима почетком 2009-е) такође су изразито детерминистичка. Иако је много урађено на увођењу метода заснованих на прорачуну вероватноће у бродограђевну праксу, осим у изузетним случајевима (као што су прописи о сигурности речних бродова намењених приобалној пловидби [3.14]), недостају конкретни прописи о динамичком стабилитету брода засновани на ризику. Допринос истраживања представљеног у овом раду, састоји се управо у могућем концепту пробабилитичких прописа о сигурности морских и речних бродова у олуји.

Предмет овог истраживања био је онај аспект сигурности који се односи на стабилитет брода изложеног (бочном) олујном ветру и таласима; према томе, прорачун кретања брода на таласима је саставни део таквог приступа стабилитету. Неки аутори [3.15] разликују (1) анализу понашања брода на таласима (seakeeping analysis) од (2) анализе стабилитета на таласима (analysis of stability in waves):

- (1) Амплитуде кретања и убрзања су умерене и велике, али прихватљиве. Брод треба пројектовати тако да боље подноси таква кретања и убрзања и оптерећења која им одговарају.

- (2) Амплитуде кретања и убрзања су екстремно велике и неприхватљиве. Брод треба пројектовати тако да не дође до таквих кретања и одговарајућих убрзања. Примери су превртање, наплављивање кроз незаштићене отворе, параметарско ваљање, итд.

Анализа стабилитета брода на таласима обухвата више ситуација које доводе до потпуног или делимичног губитка стабилитета (stability failure). Према ИМО поткомитету за стабилитет, разликују се три начина губитка стабилитета [3.16], [3.17]:

- (a) губитак стабилитета услед промене крака стабилитета на таласима;
- (b) губитак стабилитета брода који је изгубио погон (dead-ship condition);
- (c) губитак стабилитета у маневрисању.

Појаве (a) и (c) настају на подужним или косим таласима и узрокују параметарско ваљање односно брочинг, док се појава (b) односи на брод изложен бочним таласима и ветру. Свака од појава може проицасти из више различитих сценарија и може бити иницирана врло различитим узроцима (према [3.2] постоји најмање 16 различитих сценарија превртања у олуји). Сходно томе, за разлику од постојећих, нови прописи о стабилитету би требало да узму у обзир бар неколико различитих ситуација. Случај брода у бочној олуји, који је анализиран у овом истраживању и који представља предмет класичних прописа о динамичком стабилитету, заправо је само један од могућих начина губитка стабилитета.

Предложени пробабилистички приступ садржи више елемената нових досадашњој инжењерској пракси: нелинеарне диференцијалне једначине кретања, стохастички модел утицаја таласа и ветра, статистичку анализу резултата добијених нумеричким решавањем једначина. Због тога, један од циљева истраживања био је концепт једноставних, јасних и недвосмислено уобличених прописа, који би на што реалнији начин узели у обзир све релевантне утицаје на стабилитет бродова у олуји. Такође, тамо где је то било могуће, задржане су „здраве“ претпоставке садржане у класичним прописима. Наиме, прописи су углавном засновани на разумљивим и смисленим претпоставкама; недоследности представљају последицу недостатка одговарајућих рачунских алата, пре него одсуства разумевања проблема (што представља тему Поглавља 4). Надовезујући се на терминологију коришћену у релевантним истраживањима, предложени концепт прописа представља прилог развоју пробабилистичких прописа о динамичком стабилитету бродова у бочној олуји.

3.3.1 Пробабилистички прописи о динамичком стабилитету морских бродова у бочној олуји

Слично детерминистичким, предлог концепта пробабилистичких прописа о динамичком стабилитету брода, изложен у овом раду, заснива се на одређеном сценарију. Питање одговарајућег сценарија брода у бочној олуји обухвата

временске услове (висину таласа, брзину ветра) и трајање олује (тачније, време током којег је брод изложен бочним таласима и ветру).

Одговарајући сценарио подразумева екстремне али реалне временске услове. Избор сценарија представља велики изазов за пробабилистичке прописе који се ослањају на краткорочну статистику [3.16]. Полазећи од постојећих детерминистичких прописа [3.18], претпоставља се да је брод изложен променљивом, ударном бочном ветру средње брзине 26m/s и бочним нерегуларним таласима значајне висине 11m. Описани временски услови познати су као олуја *Критеријума временских услова*. Средња брзина ветра одабрана је емпиријски на основу статистичких података о поморским несрећама и потиче још из јапанског критеријума временских услова [3.19]. Према оваквом сценарију, критични догађаји, неприхватљиви са становишта сигурности су превртање (потпуни губитак стабилитета) и динамичко накретање до великих углова (делимични губитак стабилитета). Велики углови накретања ограничени су јер могу довести до наплављивања кроз незаштићене отворе, померања или губитка терета и других опасних ситуација.

Решења диференцијалних једначина – модела кретања описаних у Поглављу 2 – су закони кретања, тј. промена угла ваљања и заносење брода током времена. Тако, избор одговарајућег временског интервала постаје важан параметар пробабилистичких прописа. Ветар и таласи су нестационарне стохастичке појаве. Међутим, статистичка анализа временског узорка промене угла ваљања могућа је ако се просечне карактеристике ветра и таласа могу сматрати константним током неког временског периода (концепт квази-стационарности) [3.16]. Временски период у току којег је могуће претпоставити квази-стационарност је реда величине једног часа (обично пола сата до шест сати). У складу с тим, претпостављено је да се брод налази у бочној олуји два сата. Претпостављени временски интервал могао је бити и нешто дужи (нпр. 3 часа) или пак нешто краћи (нпр. 1 час); концепт квази-стационарности не би био нарушен. Под тим условима, могу се одредити средња вредност угла ваљања:

$$\bar{\varphi} = \frac{\sum_{i=1}^n \varphi_i(t)}{n} \quad (3.1)$$

и стандардна девијација (око средњег угла ваљања):

$$s_{\varphi} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\varphi_i(t) - \bar{\varphi}]^2}{n}}. \quad (3.2)$$

То су величине потребне за прорачун вероватноће губитка стабилитета. Ако је стохастички процес ергодски, онда се ова статистичка својства процеса могу одредити на основу једног, довољно дугог временског узорка. Губитак стабилитета

може се дефинисати као прелажење (upcrossing) угла потпуног губитка стабилитета (угао превртања) или угла делимичног губитка стабилитета (велики угао накретања). Вероватноћа губитка стабилитета P_{sf} повезана је са вероватноћом да до губитка стабилитета неће доћи P_{nsf} на следећи начин:

$$P_{sf} = 1 - P_{nsf}.$$

Вероватноћа да ће, током времена T_{exp} (у овом случају два сата), доћи до N_{sf} губитака стабилитета је, према [3.16]:

$$P_{sf}(N_{sf}) = \frac{1}{N_{sf}!} \cdot \left(\frac{T_{exp}}{T_{sf}}\right)^{N_{sf}} \cdot \exp\left(-\frac{T_{exp}}{T_{sf}}\right) \Rightarrow P_{nsf}(N_{sf}=0) = \exp\left(-\frac{T_{exp}}{T_{sf}}\right).$$

Комбиновањем горњих израза, добија се вероватноћа губитка стабилитета током времена T_{exp} :

$$P_{sf} = 1 - \exp\left(-\frac{T_{exp}}{T_{sf}}\right).$$

Може се показати да је, за гаусовски процес, учестаност превазилажења угла (потпуног или делимичног) губитка стабилитета [3.19]:

$$v_{sf} = \frac{1}{T_{sf}} = \frac{s_{\bar{\varphi}}}{2\pi \cdot s_{\varphi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\varphi_{sf} - \bar{\varphi}}{s_{\varphi}}\right)^2\right],$$

при чему је учестаност превазилажења средњег угла ваљања:

$$v_{\bar{\varphi}} = \frac{1}{T_{\bar{\varphi}}} = \frac{s_{\bar{\varphi}}}{2\pi \cdot s_{\varphi}}.$$

Следи да је вероватноћа губитка стабилитета:

$$P_{sf} = 1 - \exp\left\{-\frac{T_{exp}}{T_{\bar{\varphi}}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\varphi_{sf} - \bar{\varphi}}{s_{\varphi}}\right)^2\right]\right\},$$

односно:

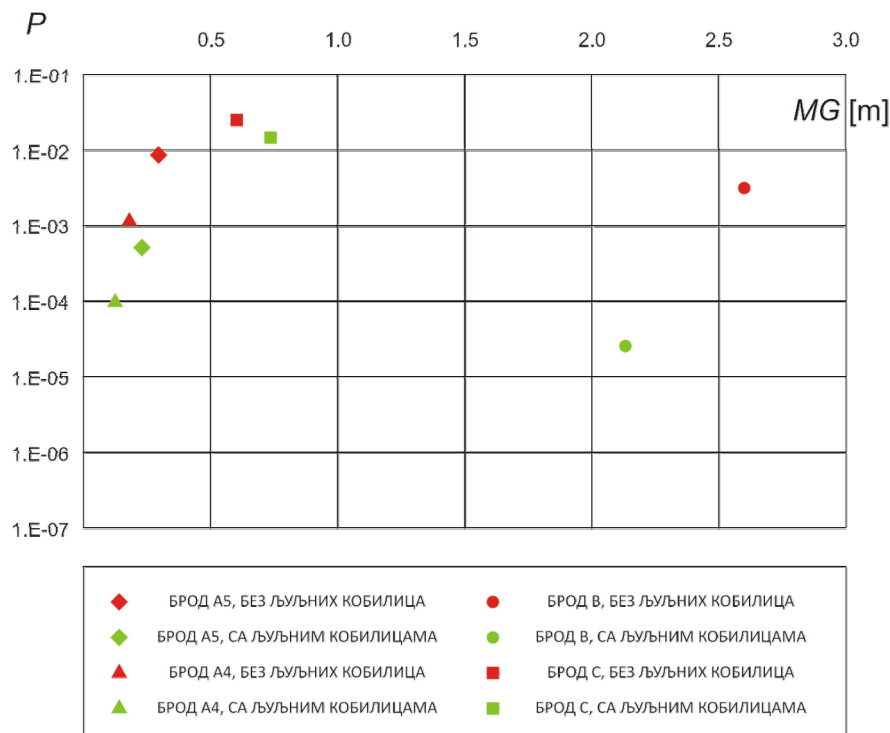
$$P_{sf} = 1 - \exp\left\{-N_c \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\varphi_{sf} - \bar{\varphi}}{s_{\varphi}}\right)^2\right]\right\} \approx N_c \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\varphi_{sf} - \bar{\varphi}}{s_{\varphi}}\right)^2\right], \quad (3.3)$$

где је:

$$N_c = \frac{T_{\text{exp}}}{T_{\varphi}}$$

број превазилажења средњег угла ваљања (број циклуса)⁴ током два часа. У општем случају, нелинеарно ваљање није гаусовски процес; такође, дискутабилно је да ли је процес ергодски.

Прихватљива вероватноћа P_{req} веома је осетљива величина чију је вредност тешко одредити. Вредност дозвољене вероватноће превртања, односно накретања до великих углова усвојена је анализом резултата нумеричких експеримената. На слици 3.3 приказани су резултати прорачуна вероватноће губитка стабилитета (превртања или динамичког накретања до угла 50°) бродова испитиваних у оквиру анализе Критеријума временских услова (студија [3.22]) у функцији метацентарске висине. Испитивани су: вишенаменски теретни брод – фидер са четири (брод А4) и пет редова контејнера на палуби (брод А4), велики путнички брод (брод В) и Ро-Ро брод, са и без љуљних кобилица. Сви испитивани бродови задовољавају минимум захтева у погледу стабилитета садржаних у прописима [3.18] и у том смислу, једнаке су сигурности према важећим детерминистичким правилима.



слика 3.3: Вероватноћа губитка стабилитета бродова испитиваних у студији [3.22]

⁴ Појмови преласка средњег угла ваљања и преласка угла при којем долази до губитка стабилитета односе се на случајеве у којима важи: $\varphi > \varphi_{sf}, \dot{\varphi} > 0$ (upcrossing).

Вероватноћа губитка стабилитета испитиваних бродова, међутим, разликује се за три реда величине. Техничка логика налаже да вредност дозвољене вероватноће буде између екстрема добијених прорачуном. Уколико би дозвољена вероватноћа била $O(10^{-4})$, већина бродова не би се могла сматрати сигурним у бочној олуји. Ако би пак била $O(10^{-2})$, већина бродова би била „сувише“ сигурна. Такође, при избору дозвољене вероватноће била је важна и анализа могућности смањења ризика код постојећих бродова како би задовољили нове прописе⁵. У складу с тим, усвојена вредност дозвољене вероватноће је:

$$P_{req} = O(10^{-3}),$$

у току два сата. Треба напоменути да одабрана вредност дозвољене вероватноће одговара налазима других истраживача. Нпр. према [3.23] дозвољена вероватноћа превртања у току једног сата је $O(10^{-4})$. Према нешто другачијој класификацији вероватноће критичног догађаја [3.2], вероватноћа „већа од 10^{-4} до 10^{-3} , по часу“ описана је као „честа“ и представља највиши ниво учестаности несрећа.

Ако брод у пловидби проводи 30% радног века, што представља 2600 сати годишње, одговарајућа вероватноћа превртања на годишњем нивоу према [3.23] била би:

$$P_{cap,annual} = 1 - (1 - P_{cap})^{2600} = 0.72. \quad (3.4)$$

Резултат упућује на то да би се брод врло вероватно преврнуо у току једне године. Међутим, то би се десило под условом да се брод током свих 2600 сати налази у бочној олуји датих карактеристика, што наравно није случај. У датом случају, формула (3.4) употребљена је погрешно, али намерно, како би се указало на разлике између поступака који користе краткорочне односно дугорочне статистике критичног догађаја. Наиме, предложени поступак анализе сигурности заснива се на краткорочној статистици кретања брода у бочној олуји. Дугорочна вероватноћа превртања брода (у току путовања, у току године или читавог радног века) морала би да обухвати све могуће правце простирања таласа и напредовања брода, случајеве крцања, стања мора, брзине и правце ветра и др. Разматрани временски период требало би поделити на интервале у току којих се временски услови и пловидбене карактеристике брода (брзина, курс) могу сматрати стационарним. Дакле, сценарио према којем је брод током два часа изложен бочним таласима и ветру одређених карактеристика представља само један сегмент који треба узети у обзир у склопу дугорочне анализе стабилитета брода на таласима. С друге стране, на стабилитет на таласима утичу и друге карактеристике брода: депласман, положај тежишта, попуњеност танкова и др. Нпр. ако се путовање подели на 20 делова, уз пет главних праваца таласа, девет стања мора, четири годишња доба, карактеристична стања крцања итд. број ситуација које треба анализирати је $O(10^5)$ [3.2].

⁵ Детаљна анализа резултата нумеричких експеримената из студије [3.22] налази се у Поглављима 4 и 6.

У складу са изложеним, кључни део прописа о динамичком стабилитету брода у бочној олуји могао би бити формулисан на следећи начин:

„Брод је изложен променљивом бочном ветру и нерегуларним бочним таласима који одговарају средњој брзини ветра од 26m/s. Под таквим условима, вероватноћа да ће се брод преврнути или да ће достићи угао од 50° у току два сата треба да буде мања од прихватљиве (дозвољене) вероватноће.“

Предложени сценарио обухвата случај брода који је остао без погона (dead-ship condition) као и брод који напредује одређеном брзином. Разлика се може узети у обзир при прорачуну љуљања брода, при чему напредовање брода додатно пригушује ваљање. Оригинални *Критеријум временских услова* развијен је за случај брода који, будући без погона, остаје изложен бочном ветру и таласима; у новијим ИМО документима *dead-ship condition* је такође претпоставка губитка стабилитета на бочним таласима. Аутор сматра да динамички стабилитет брода у бочној олуји свакако треба бити предмет провере сигурности, без обзира на узроке услед којих се брод нашао у таквим околностима. Тврдња може бити поткрепљена статистичким подацима [3.2] који показују да је превртање на бочним таласима најчешћи начин губитка стабилитета (у олујном времену). Чини се да је сценарио према којем се брод нашао изложен ударима ветра и таласа с бока, услед немогућности заповедника да управља бродом, само једно од објашњења, а не предуслов провере сигурности у бочној олуји.

3.3.2 Пробабилитички прописи о динамичком стабилитету речних бродова у бочној олуји

За разлику од морских бродова, јединствени прописи о динамичком стабилитету речних бродова не постоје. Директива 2006/87/ЕС [3.24], која је усвојена крајем 2006-е, а почела да се примењује почетком 2009-е, садржи прописе које треба да задовоље сви бродови који саобраћају на унутрашњим пловним путевима Европске Уније. Директива тежи да усагласи различите прописе који постоје у земљама чланицама, првенствено да би бродови који немају сертификат Рајнске комисије добили дозволу да плове Рајном. Иако не у потпуности, Директива следи предлог хармонизованих прописа за европске речне бродове које је припремила Радна група за водни саобраћај Економске комисије Уједињених нација за Европу [3.25].

Упркос томе, на пољу развоја прописа о стабилитету речних бродова урађено је веома мало, иако постоје индиције да речни бродови (нарочито контејнерски) могу имати низ проблема са стабилитетом, због различитих узрока [3.26], [3.27]. Сигурност постаје посебно значајна у доба пораста контејнерског транспорта на унутрашњим пловним путевима. Истраживање представљено у овом раду, практично је једини покушај да се иновативни, пробабилитички приступ проблему стабилитета уведе и у прописе који се односе на речне бродове. Ово није сасвим необично, ако се има у виду да, поред опсежног рада више

истраживачких тимова на развоју одговарајућих прописа за морске бродове, те много већег значаја поморског саобраћаја у односу на транспорт унутрашњим пловним путевима, нови прописи [3.28] о стабилитету морских бродова нису значајно другачији од оригиналног Критеријума временских услова.

Будући да је речни брод изложен само дејству ударног ветра (али не и озбиљнијем дејству таласа), мањи је број ситуација у којима може доћи до великих углова накретања опасних по стабилитет брода. Па ипак, то не значи да је једноставније формулисати одговарајући сценарио, тј. описати ситуацију у којој стабилитет речног брода у олуји може бити угрожен. Затим, поставља се питање захтеваног нивоа сигурности (дозвољене вероватноће губитка стабилитета) у таквој ситуацији. У случају морских бродова, дозвољена вероватноћа $P_{req} = O(10^{-3})$ одговарала је двочасовној бочној олуји. Ради лакшег поређења нивоа сигурности (речни брод морао би да буде бар истог нивоа сигурности као морски), иста вредност дозвољене вероватноће усвојена је и у предлогу прописа о динамичком стабилитету речних бродова.

Претпоставља се да је брод изложен променљивом, ударном бочном ветру средње брзине 18m/s. Средња брзина ветра одабрана је на основу вредности статичког притиска ветра за Зону 2, препоручене у прописима [3.25]. Критични догађаји, неприхватљиви са становишта сигурности су накретање брода до угла наплављивања кроз незаштићене отворе (делимичан губитак стабилитета) или превртање (потпуни губитак стабилитета) ако је угао превртања мањи од угла наплављивања. Према томе, кључни део пробабилистичких прописа о динамичком стабилитету речних бродова могао би бити формулисан на следећи начин:

„Брод је изложен променљивом бочном ветру средње брзине од 18m/s. Под таквим условима, вероватноћа да ће се брод преврнути или наплавити кроз незаштићене отворе у току два сата треба да буде мања од прихватљиве (дозвољене) вероватноће.“

Предложени концепт пробабилистичких прописа за морске бродове обухвата случај брода који је изгубио погон. Када су у питању бродови унутрашње пловидбе, ограничена ширина речног тока не дозвољава слободно заношење брода. Брод мора да задржи правац напредовања, тј. да настави да се креће неком „средњом“ трајекторијом, што би механички модел кретања требало да представи на одговарајући начин. Поређење резултата добијених различитим моделима кретања речног контејнерског брода под налетима ветра (о чему је било речи у Поглављу 2) показало је да вероватноћа губитка стабилитета зависи од избора модела. Како се пробабилистички прописи заснивају на „најреалнијем“ а не „најопаснијем“ сценарију, то значи да би нови прописи намењени речним бродовима захтевали одређени модел кретања који би, поред ваљања, обухватио и „контролисано“ заношење. Тако, предложени пробабилистички прописи о сигурности речних бродова – донекле неочекивано, с обзиром на релативну једноставност проблема због одсуства таласа – наглашавају питање адекватности модела нелинеарног ваљања.

Иако се проблем пробабилистичких прописа о сигурности бродова унутрашње пловидбе оправдано чини једноставнијим, постоје одређене дилеме у вези предложене формулације. Нпр. поставља се питање да ли је реално да речни брод читава два сата буде изложен налетима олујног ветра са бока. Да ли је то реалан правац ветра и, ако јесте, да ли је могуће да ће пловидба бити настављена у оваквим, олујним временским условима или капетан „може да одустане од путовања и настави га чим прође невреме“ [3.29]? Што се тиче првог питања, статистички подаци изнети у студији [3.29] показују да су ветрови одговарајуће брзине и правца довољно чести да би се сматрали реалним, односно да би морали бити узети у обзир у прописима. (Нпр. мерења метеоролошких станица у Београду и Новом Саду, показују да ветар јачине 8°V – што одговара брзини ветра од 17 до 21m/s – дува у просеку 15 дана годишње.) Иако, у недостатку одговарајућих упутстава за капетане, на друго питање не можемо дати поуздан одговор, уврежено схватање о сигурности унутрашње пловидбе могло би навести капетана на одлуку која би озбиљно угрозила брод и терет. Опасности посебно могу доћи до изражаја код будућих контејнерских бродова намењених пловидби на Дунаву, о чему ће бити више речи у поглављима која следе.

Ниво ризика код речних бродова не би смео бити већи него код морских бродова. Осим тога, показало се да је предложена дозвољена вероватноћа губитка стабилитета прихватљива са становишта умањења трошкова ризика, односно да би већина постојећих бродова задовољила пробабилистички критеријум. Чињеница да се постојећи речни контејнерски бродови могу сматрати сигурним, што је повезано са „добром бродограђевном праксом“ која углавном потиче са Рајне, носи одређене опасности. Решења развијена на Рајни, не могу се једноставно пренети на Дунав. Пробабилистичка анализа показала је да добра бродограђевна пракса – на којој се заснивају постојећи прописи – не би била одговарајућа за бродове пројектоване за Дунав, бар када је у питању сигурност у олуји.

Предложени пробабилистички прописи проистекли су из анализе кретања речних и морских бродова употребом рачуна вероватноће и нелинеарних модела кретања брода описаних у Поглављу 2. Пробабилистичка анализа може се користити и за испитивање постојећих прописа са становишта прорачуна кретања брода у реалним временским приликама, анализу несрећа, као и за побољшање сигурности брода у фази пројектовања, чему су посвећена наредна поглавља.

3.4 Литература

- 3.1 "Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for Use in the IMO Rule-Making Process", MSC/Circ. 1023, MEPC/Circ. 392, International Maritime Organization, London, 5 April 2002.
- 3.2 Kobylinski, L. K., Kastner, S. "Stability and Safety of Ships. Volume I: Regulation and Operation" Elsevier, Oxford, 2003.
- 3.3 Hoppe, H., "Goal-Based Standards – A New Approach to the International Regulation of Ship Construction", WMU Journal of Maritime Affairs, Vol. 4, No. 2, October 2005.
- 3.4 Hoppe, H., "IMO's work on goal-based new ship construction standards - an overview", Transcript of Presentation, Annual Meeting of The Royal Institution of Naval Architects, London, 2007.
- 3.5 Kobylinski, L. K., "Proposed Approach to Stability Requirements Based on Goal Determination and Risk Analysis", Scientific Journals, Maritime University of Szczecin, 13(85), 2008, pp. 33-39.
- 3.6 Assheuer, S., "Goal Based Standards – A unique chance to define a new framework for the development of rules and regulations", INTERTANKO Annual Tanker Event, Athens, 2005.
- 3.7 Det Norske Veritas, "Risk Evaluation Criteria", SAFEDOR Project Public Report, 2007.
- 3.8 "Goal-Based New Ship Construction Standard – Considerations on Some Basic Building Blocks in Goal-Based Standards", Submitted by Denmark and Norway, Maritime Safety Committee, 80th Session, Agenda Item 6, 4 March 2005.
- 3.9 "Guidance on the Safety Role of the Naval Architect", The Royal Institution of Naval Architects, London, January 2009.
- 3.10 "Amendments to the Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for Use in the IMO Rule-Making Process", International Maritime Organization, London, 16 October 2006.
- 3.11 "Formal Safety Assessment – FSA – container vessels", Submitted by Denmark, Maritime Safety Committee, 83rd Session, Agenda Item 21, 3 July 2007.
- 3.12 Kontovas, Ch. A., Psaraftis, "Formal Safety Assessment: A Critical Review", Marine Technology, Vol. 46, No. 1, January 2009, pp. 45–59.
- 3.13 Wang, G., Spencer, J. and Chen, Y.J. "Assessment of ship's performance in accidents", Journal of Marine Structures, 15, 2002, pp. 313-333.
- 3.14 "Moniteur Belge / Belgisch Staatsblad", No. 81, Brussels, 16 March 2007.

- 3.15 Belenky, V., Breuer, A., "Intact and Damage Stability of Ships and Offshore Structures – Bridging the Gap", Proceedings of the 10th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures (PRADS), Houston, 2007.
- 3.16 Belenky, V., Kat, J. O. de, Umeda, N., "Toward Performance-Based Criteria for Intact Stability", Marine Technology, Vol. 45, No. 2, April 2008, pp. 101-123.
- 3.17 "Review of the Intact Stability Code", Report of the working group, IMO Sub-Committee on Stability and Load Lines and on Fishing Vessels Safety, 48th Session, WP2, Agenda Item 4, 15 September 2005.
- 3.18 Resolution A.562(14) "Recommendation on a severe wind and rolling criterion (weather criterion) for the intact stability of passenger and cargo ships of 24 metres in length and over", International Maritime Organization, 1985.
- 3.19 Yamagata, M., "Standard of Stability Adopted in Japan", Transactions of The Institution of Naval Architects, Vol. 101, London, 1959, pp. 33-39.
- 3.20 Bulian, G., Francescutto, A., "A Simplified Modular Approach for the Prediction of the Roll Motion due to the Combined Action of Wind and Waves", Proceedings Inst. Mech. Eng. Vol. 218, Part M, Journal of Eng. for the Maritime Environment 2004, pp. 189-212.
- 3.21 Faltinsen, O., "Sea Loads on Ships and Offshore Structures", Cambridge University Press, 1995.
- 3.22 Hofman, M., Bačkalov, I., "Weather Criterion for Seagoing and Inland Vessels – Some New Proposals", Proceedings of International Conference on Marine Research and Transportation, ICMRT '05, University of Naples "Federico II", September 2005, pp. 53-62.
- 3.23 McTaggart, K., et al, "Capsize Probability Polar Plots for Ship Operator Guidance", Proceedings of the 6th International Ship Stability Workshop, Webb Institute, 2002.
- 3.24 Directive of the European Parliament and of the Council, laying down technical requirements for inland waterway vessels (2006/87/EC), Official Journal of European Union, 12 December 2006.
- 3.25 United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), Inland Transport Committee, Working Party on Inland Water Transport, "Recommendations on Harmonized Europe-Wide Technical Requirements for Inland Navigation Vessels (Resolution No. 61)", March 2006.
- 3.26 Woinin, P., "Awaiting a Tragedy on Inland Waterways", <http://users.skynet.be/p.woinin/index.html>, 2003.
- 3.27 Zimmerman, R. J., "Innovations in Inland Waterway Logistics", Друштво бродограђевних инжењера и техничара, Београд, 25. фебруар 2008.
- 3.28 Resolution MSC.267(85) "Adoption of the International Code On Intact Stability, 2008 (2008 IS CODE)", Maritime Safety Committee, 4 December 2008.

- 3.29 Рибар, Б., „Студија о стабилности речних бродова и услова које брод у погледу стабилности треба да испуни“, Интерни извештај, Машински институт САНУ „Владимир Фармаковски“, Одељење за бродоградњу, Београд, 1963.

4. Критичка анализа постојећих прописа о стабилитету

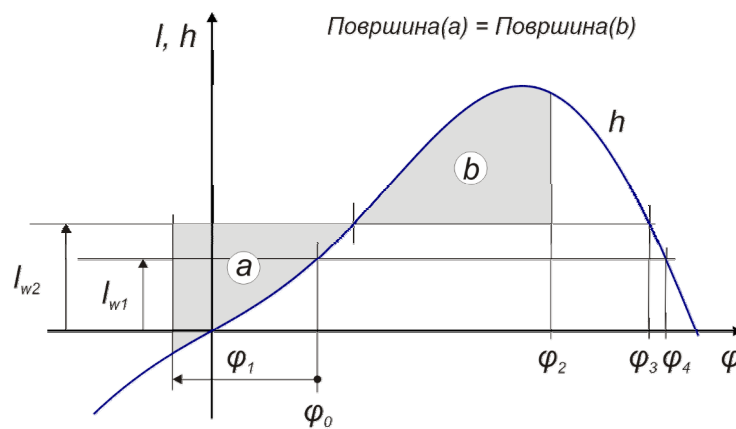
У време настајања *Критеријума временских услова* (50-их година прошлог века), услед недостатка одговарајућих теоријских знања, у употребу је ушао низ приближних поступака којима се узимају у обзир карактеристике брода и дејство спољашњих сила. Иако је, током наредних деценија, наука о понашању брода на таласима значајно напредовала, настављено је са применом приближних поступака, јер није било одговарајућих алата (рачунара) којима би било могуће симулирати кретања брода под дејством ветра и таласа. „Класичан“ приступ проблему стабилитета, који се служи овим апроксимативним методима, наставља да се користи како у новом, ревидираном Критеријуму временских услова, тако и у најновијим прописима о стабилитету речних бродова. Нелинеарни модели ваљања (описани у Поглављу 2) и статистичка анализа добијеног закона кретања (о којој је било речи у Поглављу 3), омогућавају примену иновативног, пробабилистичког приступа сигурности брода у олуји. Најважнија предност оваквог приступа је могућност да се спољашње силе и моменти моделују реалније него применом класичних метода. За разлику од детерминистичких прописа, који захтевају сигурност у условима који би се могли сматрати најопаснијим, захтеви пробабилистичких прописа односе се на екстремне, али реалне околности. Применом пробабилистичке анализе, кретања брода могу се тачније предвидети, па пројектовани брод не мора бити ограничен детерминистичким захтевима да би се постигао потребан ниво сигурности у олуји. Правила далекосежно утичу на пројектовање: некада безразложно намећу неодговарајућа (и скупа) решења, која (у најгорем случају) не пружају довољну сигурност. Развој прописа заостаје за развојем нових типова бродова и успорава га. Пробабилистички приступ сигурности требало би да реши ове проблеме и да дâ већу слободу пројектантима (о чему ће бити више речи у Поглављу 6).

4.1 Критичка анализа Критеријума временских услова

Најважнији пропис о динамичком стабилитету морских бродова, *Критеријум временских услова*, дефинисан је резолуцијом ИМО Скупштине А.562(14) [4.1]. Резолуција се примењивала на путничке и теретне бродове дужине

24m и више, и рибарске бродове дужине 45m и више. Ова, као и низ других резолуција које се односе на стабилитет неоштећених бродова, 1993. године замењена је резолуцијом А.749(18), тј. Кодом о стабилитету неоштећених бродова (Intact Stability – IS Code). У децембру 2008. усвојени су нови прописи, тзв. 2008 IS Code [4.2] који би требало да ступе на снагу средином 2010-е. Сви документи садрже Критеријум олујног ветра и ваљања (Критеријум временских услова) у готово неизмењеном облику. Критеријум претпоставља да се брод налази у олуји, изложен ударима бочног ветра и бочним таласима, и ограничава максимални угао динамичког накретања φ_2 (слика 4.1). Критеријум претпоставља следећи сценарио:

- брод је изложен константном притиску ветра који делује управно на централну линију брода, услед чега настаје константан момент накретања крака l_{w1} који накреће брод до угла статичког накретања φ_0 ;
- у односу на положај статичке равнотеже φ_0 , услед дејства таласа, брод се ваља амплитудом φ_1 ⁶;
- када се брод нађе у положају амплитуде ка ветру, долази до изненадног удара ветра, константног момента накретања крака $l_{w2} = 1.5 \cdot l_{w1}$;
- угао динамичког накретања φ_2 под дејством ветра l_{w2} треба бити мањи од угла наплављивања или од 50° , или од угла превртања φ_3 , шта год да је мање.



слика 4.1: Сценарио Критеријума временских услова

Недостаци Критеријума временских услова не налазе се у основној замисли – настојању да се ограничи угао динамичког накретања брода изложеног олујном ветру и таласима, тако да буде мањи од угла делимичног или потпуног губитка стабилитета – већ у поступку прорачуна траженог угла. Остављајући детаљнију анализу Критеријума по страни (о чему постоји довољно литературе, нпр. [4.3],

⁶ Нови прописи о стабилитету неоштећених бродова (2008 IS Code) садрже додатни захтев према којем је угао статичке равнотеже φ_0 ограничен на 16° или 80% од угла при којем палуба улази у воду, шта год да је мање.

[4.4] те занимљив дипломски рад [4.5]), биће укратко наведени најважнији недостаци претпоставки које се у Критеријуму користе. Сценарио Критеријума не узима у обзир истовремено дејство таласа и ветра (дејство таласа престаје у тренутку удара ветра l_{w2}); брзина ветра је константна, као и удар ветра (50%); амплитуда ваљања брода на таласима φ_1 рачуна се, на врло непоуздан начин, као 70% амплитуде резонантног ваљања на регуларним таласима; обрасци за прорачун неких карактеристика бродске форме, које утичу на тражене углове φ_0 и φ_1 (средњи период ваљања, момент инерције брода за осу ваљања) застарели су и не одговарају модернијим типовима бродова (видети нпр. [4.6], [4.7]), итд.

Пробабилистичка анализа стабилитета брода у бочној олуји, која се састоји од одговарајућег модела нелинеарног ваљања (**једначина 2.6**) и статистичке анализе кретања брода, омогућава да одбацимо низ приближних поступака а временске услове (ветар и таласе) узмемо у обзир преко енергетских спектара, приближно реалним процесима у природи. Ове предности пробабилистичког приступа коришћене су током истраживања за процену нивоа сигурности који обезбеђују постојећи прописи о стабилитету. У том смислу, најпре је испитиван Критеријум временских услова, а резултати испитивања објављени су у раду [4.8].

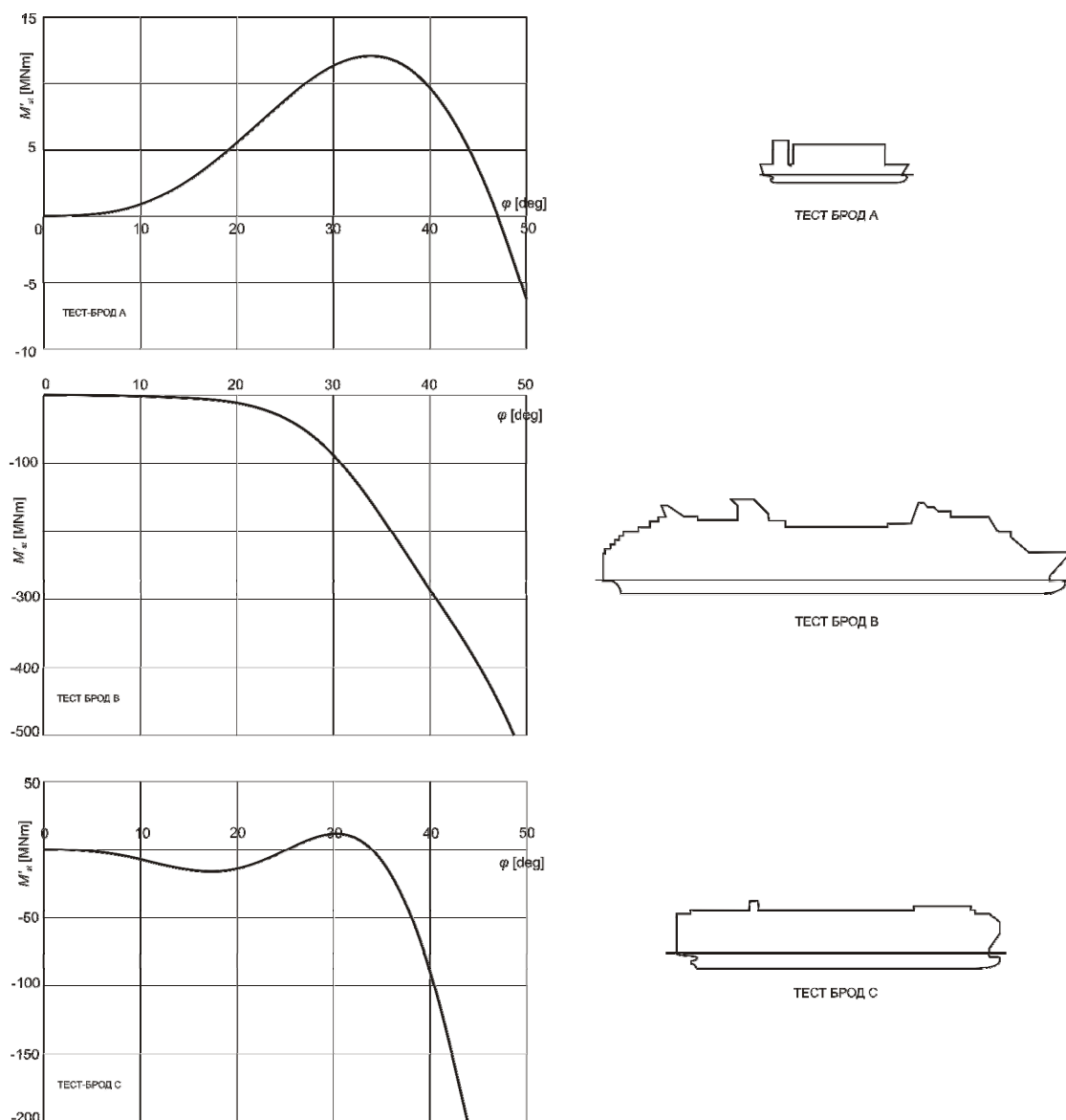
За потребе анализе, урађена је серија нумеричких експеримената на тест-бродовима (слика 4.2). Одабрани тест-бродови разликовали су се у великој мери по свим карактеристикама (депласману, основним димензијама, намени) осим по једној; сви бродови имали су велику надводну латералну површину, због чега се могло очекивати да су осетљивији на ударе ветра. Одабрани су следећи тест-бродови:

- Брод А: вишенаменски теретни брод / мали контејнерски брод (фидер) са 4, односно 5 редова контејнера на палуби (у ознаци А4 и А5, респективно);
- Брод В: велики путнички брод – крузер;
- Брод С: брод за превоз аутомобила – Ро-Ро брод.

Основне карактеристике тест-бродова дате су у табели 4.1. Осим по намени и димензијама, тест-бродови су се разликовали и по моментима додатног стабилитета (слика 4.2).

Табела 4.1: Анализа Критеријума временских услова: основне димензије тест-бродова

Тест-брод	А	В	С
L [m]	86	272	188
B [m]	16.5	32.2	32.2
T [m]	5.1	7.5	9.1
D [t]	5985	41350	37204
A_L [m ²]	1252.4 (А4) 1410.5 (А5)	10197.5	5339.8



слика 4.2: Морски тест-бродови коришћени у анализи Критеријума временских услова

Основна идеја Критеријума, као и оне техничке појединости које су сматране реалним, задржане су у нумеричким експериментима. Брод је изложен променљивом ветру средње брзине 26m/s и одговарајућим бочним нерегуларним таласима (тзв. олуја Критеријума временских услова). Крак момента ветра узима се као вертикално растојање геометријских тежишта надводне и подводне површине, а хидродинамички момент пригушења ваљања рачуна се на основу препорука садржаних у Критеријуму (Метод Јамагате).

У првој серији нумеричких експеримента, сви тест-бродови задовољавали су минималне захтеве у погледу стабилитета, према Критеријуму временских

услова, тј. имали су минималне метацентарске висине MG_{min} . Брод који има минималну метацентарску висину, задовољава:

$$\varphi_2 = \varphi_3 \text{ или } \varphi_2 = 50^\circ \text{ (ако је } \varphi_3 > 50^\circ \text{)}$$

Може се рећи да су бродови са тако одређеним минималним метацентарским висинама „једнаки“ пред Критеријумом временских услова, тј. да имају исти (минимални) ниво сигурности према класичним методама. За бродове таквих карактеристика, нумеричким тестовима одређена је вероватноћа превртања, односно достизања угла од 50° (вероватноћа потпуног или делимичног губитка стабилитета). Угао превртања у овим прорачунима био је φ_4 (слика 4.1). Под условом да је израчуната вероватноћа губитка стабилитета иста за све бродове, и за различита стања крцања, бродови би имали једнак ниво сигурности према пробабилистичком приступу. Између класичног и пробабилистичког приступа могла би да се успостави корелација, што би истовремено олакшало избор вредности прихватљиве вероватноће P_{req} . Међутим, добијени резултати намећу другачије закључке.

Најпре је испитиван утицај избора спектра таласа на вероватноћу превртања. Резултати испитивања дати су у Табели 4.2. Коришћени су:

- двопараметарски Бретшнајдеров (BSC), значајне висине таласа 11m и модалног периода једнаког сопственом периоду ваљања брода;
- двопараметарски Бретшнајдеров (BSC), значајне висине таласа 11m и средњег периода од 11s;
- двопараметарски ЏОНСВАП (JON) спектар, значајне висине таласа 11m и модалног периода једнаког сопственом периоду ваљања брода;
- двопараметарски ЏОНСВАП (JON) спектар, значајне висине таласа 11m и средњег периода од 11s;
- једнопараметарски Пирсон-Московицев спектар, значајне висине таласа 11m.

Случај када је модални период спектра једнак сопственом периоду ваљања брода може се сматрати најопаснијим; средњи период од 11s је приближно највероватнији период у олуји Критеријума временских услова, према просеку на светским морима. Приказани резултати односе се на брод А, који за стање крцања са 5 редова контејнера на палуби има минималну метацентарску висину $MG_{min} = 0.23m$ и угао превртања $\varphi_{cap} = 48^\circ$. Добијена вероватноћа превртања брода (за одређено стање крцања) истог је реда величине без обзира на спектар таласа. Ниво сигурности која се постиже применом Критеријума временских услова не зависи од избора спектра таласа и средњег периода. На основу резултата приказаних у табели 4.2, може се закључити је Критеријум, у овом погледу, конзистентан са пробабилистичке тачке гледишта, као и да би дозвољена вероватноћа превртања могла бити $O(10^{-4})$.

Табела 4.2: Утицај спектра таласа на вероватноћу превртања брода А

Спектар таласа	$\bar{\varphi}$ [°]	s_{φ} [°]	P_{cap}
<i>BSC</i> , $T_m = T_{\varphi}$	18.04	5.80	6.82E-4
<i>BSC</i> , $\bar{T} = 11s$	18.01	5.74	5.10E-4
<i>JON</i> , $T_m = T_{\varphi}$	18.06	5.72	4.80E-4
<i>JON</i> , $\bar{T} = 11s$	18.05	5.68	3.95E-4
<i>PM</i>	18.07	5.58	2.33E-4

У наставку, одређене су минималне метацентарске висине (минимални ниво сигурности према Критеријуму временских услова) брода А, за различите случајеве крцања (4 и 5 редова контејнера на палуби) и за различите моменте пригушења ваљања (брод са и без љуљних кобилица). Затим је, пробабилистичком анализом, одређена вероватноћа превртања брода А за сваки од четири случаја. Добијене вероватноће превртања, за Бретшнајдеров спектар средњег периода од 11s, разликују су се за готово два реда величине (Табела 4.3). Сва четири случаја задовољавају детерминистичке прописе и, према томе, имају исти ниво сигурности према класичном поступку за проверу стабилитета. Међутим, према статистичкој анализи кретања, сигурност бродова у олуји значајно се разликује. Критеријум временских услова, дакле, није конзистентан са пробабилистичке тачке гледишта, а избор дозвољене вероватноће губитка стабилитета, на основу сигурности остварене Критеријумом, доведен је у питање.

Табела 4.3: Утицај крцања и љуљних кобилица на вероватноћу превртања брода А

Брод	ЉК	MG_{min} [m]	φ_{cap} [°]	$\bar{\varphi}$ [°]	s_{φ} [°]	P_{cap}
A5	✓	0.230	47.97	18.01	5.74	5.10E-4
A5	✗	0.295	49.43	16.23	7.14	8.59E-3
A4	✓	0.124	43.36	18.28	5.10	1.00E-4
A4	✗	0.180	47.70	16.54	6.19	1.20E-3

Пробабилистичка анализа открила је још веће разлике између сигурности коју у олуји имају бродови различитих типова и димензија (Табела 4.4). Статистичком анализом ваљања тест-бродова В и С изложених истовременом стохастичком дејству ветра и таласа, добијене су вероватноће превртања које се разликују за чак три реда величине, иако су бродови имали исти ниво сигурности према Критеријуму временских услова.

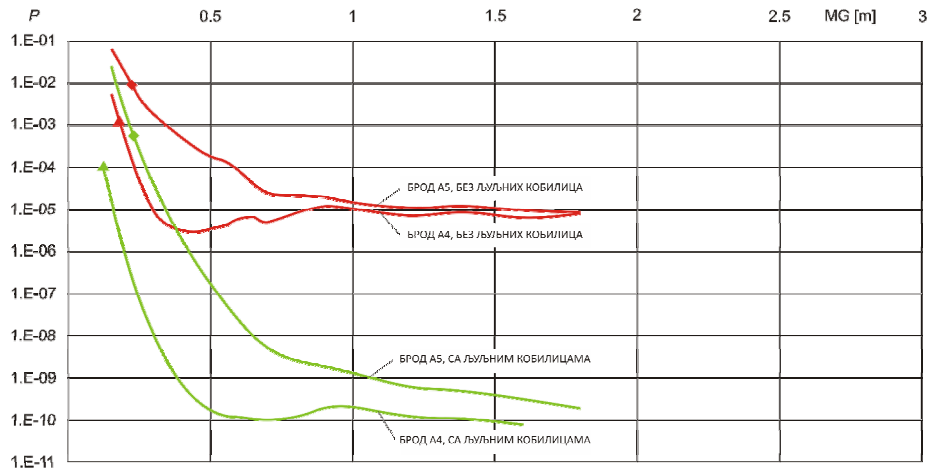
Табела 4.4: Вероватноћа превртања бродова В и С

Брод	ЉК	MG_{min} [m]	φ_{cap} [°]	$\bar{\varphi}$ [°]	s_{φ} [°]	P_{cap}
V	✓	2.132	50	8.24	7.19	2.26E-5
V	✗	2.329	50	7.97	8.16	9.49E-4
C	✓	0.628	40.45	15.42	5.80	1.95E-2
C	✗	0.737	41.61	12.91	6.27	6.20E-3

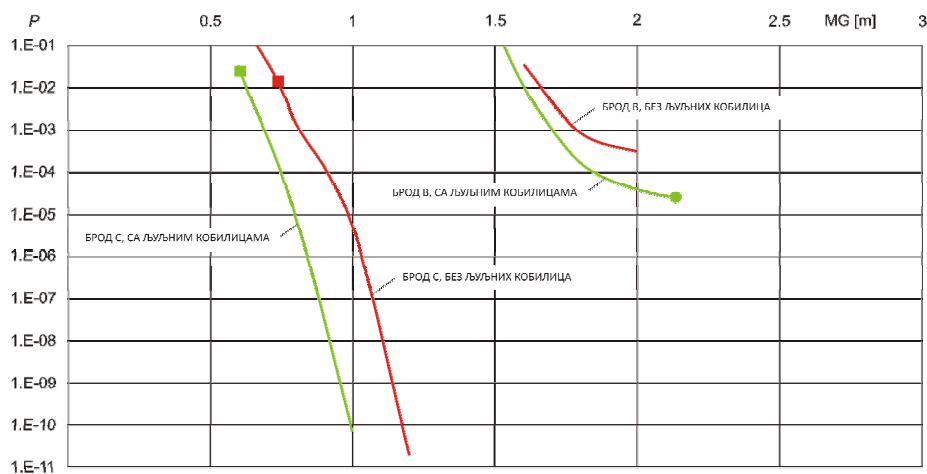
Закључујемо да се Критеријум временских услова не може сматрати конзистентним са пробабилистичке тачке гледишта, те да се сигурност остварена применом Критеријума не може искористити као референтни ниво при избору дозвољене вероватноће превртања P_{req} .

На основу приказаних резултата, усвојена је вредност дозвољене вероватноће губитка стабилитета $P_{req} = O(10^{-3})$ (Поглавље 3). Уобичајено је да трошкови умањења ризика буду разматрани као један од критеријума при одређивању прихватљивог нивоа ризика [4.9]. У том смислу, занимљиво је испитати да ли би мањим интервенцијама на броду (корекцијом метацентарске висине или криве крака стабилитета) могао да се постигне усвојени минимални ниво сигурности код свих постојећих бродова? Због тога је у наредној серији нумеричких експеримената пробабилистичка анализа проширена са минималне MG на опсег метацентарских висина. Добијени резултати приказани су у виду тзв. „пробабилистичких кривих“ које прате промену вероватноће превртања у функцији метацентарске висине (слике 4.3 и 4.4). Резултати се односе на вероватноћу превртања у два часа, током којих је брод изложен бочној олуји описаној одговарајућим енергетским спектрима. Амплитуде таласа добијене су из Бретшнајдеровог спектра таласа значајне висине 11m и средњег периода 11s, и Давенпортовог спектра ветра средње брзине ветра 26m/s и коефицијента храпавости терена 0.003, који одговара отвореном мору. Иако све пробабилистичке криве показују да са порастом метацентарске висине вероватноћа превртања опада, неке криве имају већи од других што указује на већу осетљивост сигурности на промену MG . Таква разлика посебно је уочљива између бродова који (у овом нумеричком експерименту) са минималним метацентарским висинама не би задовољили пробабилистички критеријум сигурности; у питању су брод А са пет редова контејнера на палуби, без љуљних кобилица и брод С, са и без љуљних кобилица. Подручје око минималних метацентарских висина (из табела 4.3 и 4.4) посебно је занимљиво. Да би брод С достигао тражени ниво сигурности, било би потребно повећати минималну метацентарску висину за око 5cm. Код брода А5, то би било могуће тек ако се MG_{min} повећа за готово 15cm. Ако би пак дозвољена вероватноћа губитка

стабилитета била још нижа, нпр. $P_{req} = O(10^{-4})$, биле би потребне још веће корекције MG_{min} и на већем броју бродова. У сваком случају, без обзира на одабрани минимални ниво сигурности, не би сви постојећи бродови једноставно задовољили предложени пробабилистички критеријум.



слика 4.3: Пробабилистичке криве: вероватноћа превртања у функцији MG за брод А



слика 4.4: Пробабилистичке криве: вероватноћа превртања у функцији MG за бродове В и С

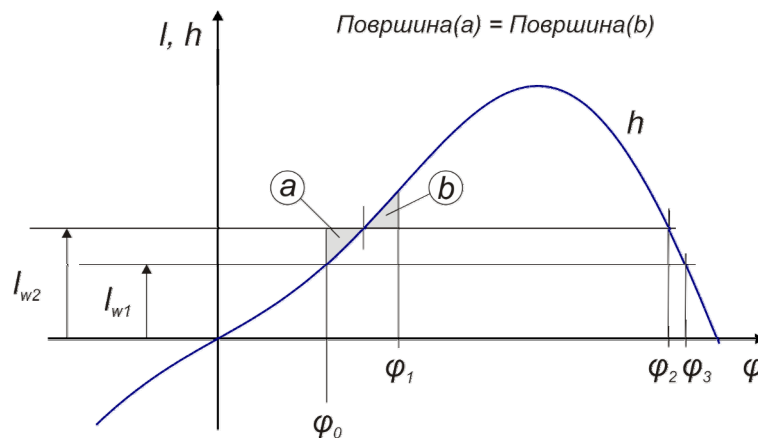
Без обзира на то што сви испитивани случајеви задовољавају Критеријум временских услова, неки бродови имају врло високе вероватноће превртања, и до три реда величине више од других. Пробабилистичка анализа указује на најопаснији недостатак детерминистичких прописа – овакви прописи понекад дају само привид сигурности. Критика Критеријума временских услова, међутим, открива и једну веома значајну карактеристику пробабилистичке анализе. Пробабилистичка анализа има способност рангирања бродова према сигурности, и то како бродова различите намене, форме и димензија (бродови А, В и С), тако и истих бродова у нпр. различитим случајевима крцања, са различитим метацентарским висинама, итд.

4.2 Критичка анализа постојећих прописа о стабилитету речних контејнерских бродова

Критеријуми за проверу стабилитета садржани у ИМО резолуцијама представљају јединствене прописе, обавезне за све морске бродове (одређених димензија), без обзира на заставу. Јединствени прописи тог типа не постоје на унутрашњим пловним путевима. Међутим, неки прописи (нпр. Правила Југорегистра [4.10] и Руског речног регистра [4.11]) садрже критеријуме врло сличне Критеријуму временских услова, који узимају обзир динамичко накретање брода под дејством удара ветра. Због тога, пробабилистичку анализу проширујемо на тзв. *Речни критеријум временских услова*. Резултати ове анализе публиковани су у студији [4.8].

Речни критеријум временских услова [4.10], [4.11] ограничава максимални угао динамичког накретања брода изложеног ударима бочног ветра. Речни критеријум претпоставља следећи сценарио (слика 4.5):

- брод је изложен дејству ветра константног момента накретања крака I_{w1} , услед чега се накреће до угла статичког накретања φ_0 ;
- у положају статичке равнотеже φ_0 , брод бива захваћен ударом ветра константног момента накретања крака I_{w2} ;
- угао динамичког накретања φ_1 под дејством ветра I_{w2} треба бити мањи од угла превртања φ_2 или угла наплављивања.



слика 4.5: Сценарио Речног критеријума временских услова

Услед ограничене водене површине преко које дува ветар, на реци не могу да се развију таласи чији би утицај на кретање брода био упоредив са морским таласима. С обзиром да нема таласа (тј. утицај постојећих таласа је занемарљив), Речни критеријум временских услова значајно је једноставнији од одговарајућег прописа за морске бродове. Самим тим, Речни критеријум садржи и мањи број претпоставки које би могле бити доведене у питање. Осим тога, присутна су и нека побољшања у односу на ИМО пропис. Иако је момент ветра константан, Речни

критеријум узима у обзир пораст брзине ветра са висином. Крак момента ветра представља вертикално растојање тежишта надводне латералне површине од водне линије. Удар ветра повећава притисак ветра за 70% (у односу на 50% у ИМО Критеријуму), што је у складу са већим храпавошћу околног терена на унутрашњим пловним путевима, која би изазвала јача турбулентна кретања.

Пробабилистичка анализа Речног критеријума временских услова изведена је на речном тест-броду, типичном европском речном броду за превоз контејнера (слика 4.6), дужине 110m, ширине 11.4m и газа 3.3m. Контејнерски брод одабран је због велике надводне латералне површине која га чини осетљивијим на ударе ветра. У нумеричком експерименту, брод носи пет редова контејнера по висини, што се може постићи само врло пажљивим распоредом контејнера различитих маса. Ваљање брода под дејством стохастички променљивог ветра, средње брзине 20m/s, чије су амплитуде удара добијене из Давенпортовог спектра ветра, моделовано је **једначином 2.7**. Поново, у првом нумеричком експерименту, симулирано је кретање брода са минималном метацентарском висином према Речном критеријуму временских услова:

$$\varphi_1 = \varphi_2 \Rightarrow MG_{min} = 0.792m.$$

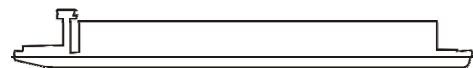
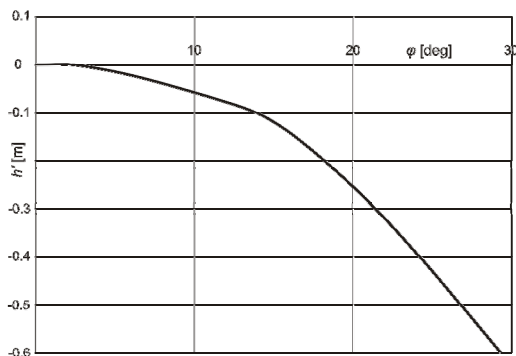
Угао превртања брода (потпуног губитка стабилитета) који одговара минималној метацентарској висини, одређен је из услова:

$$\varphi_{cap} = \varphi_3 \Rightarrow \varphi_{cap} = 17.4^\circ.$$

Угао наплављивања отвореног складишта одабран је за угао делимичног губитка стабилитета:

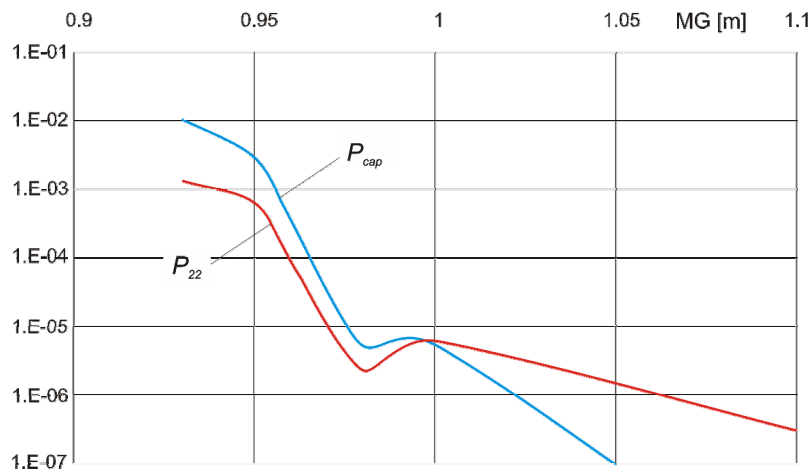
$$\varphi_{fl} = 22^\circ.$$

Нумеричка симулација дала је неочекиване резултате. Статистичка анализа добијеног кретања показала је да је брод веома несигуран у бочној олуји. Речни контејнерски брод са минималним нивоом сигурности према детерминистичким прописима, превртао се за мање од десет минута!



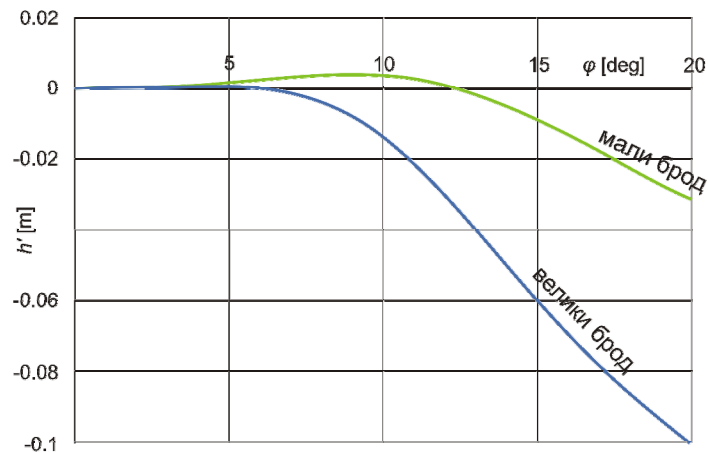
слика 4.6: Речни тест-брод коришћен у анализи Речног критеријума временских услова

Иако вероватноћа превртања брзо опада са порастом метацентарске висине (слика 4.7), из резултата нумеричког експеримента може се закључити да ни Речни критеријум временских услова не успева да обезбеди довољну сигурност у бочној олуји. Притом, прорачуни су урађени са коефицијентом храпавости околног терена $K = 0.003$ који се користи за отворено море, док би речном току одговарала нека виша вредност, услед чега би удари ветра били јачи, а вероватноћа губитка стабилитета већа. Међутим, будући да оваквих несрећа нема на унутрашњим пловним путевима (или су веома ретке, а узроци су сложенији од удара олујног ветра) јавља се сумња у поузданост резултата. Проблем треба детаљније проучити.



слика 4.7: Пробабистичке криве речног контејнерског брода испитиваног у студији [4.8]

Због тога, анализа динамичког стабилитета речних бродова у олуји проширена је на два речна тест-брода, чије су основне карактеристике дате у Табели 4.5. Бродови имају отворено складиште, без поклопаца, намењено превозу контејнера. Криве крака додатног стабилитета испитиваних бродова приказане су на слици 4.8. Резултати испитивања објављени су у [4.12].



слика 4.8: Криве крака додатног стабилитета бродова испитиваних у студији [4.12]

Испитивано је више случајева крцања, са три, четири и пет редова контејнера по висини код „великог“, односно три и четири реда контејнера код „малог“ брода. Крцање пет редова контејнера по висини, код бродова дужине 110m није уобичајено, иако се може постићи пажљивом расподелом контејнера различите масе. Крцање највише четири реда (уместо пет), последица је бродарске праксе а не прописа који би забрањивали такав начин крцања⁷. Пошто је, у случају крцања максималног броја контејнера по висини, стабилитет брода у бочној олуји најугроженији, и овај случај мора бити предмет анализе. Осим тога, пробабилистичка анализа омогућава искорак изван „добре бродограђевне (или бродарске) праксе“ јер се заснива на прорачуну реалних кретања у датим временским условима. Брод не мора бити ограничен (детерминистичким) прописима који не узимају у обзир све параметре релевантне за сигурност, нити праксом проистеклом из рада са бродовима другачијих карактеристика. Другим речима, пробабилистичка анализа може показати да је неко „неортодоксно“ решење, као што је крцање пет редова контејнера по висини, прихватљиво са становишта сигурности, што омогућава креативнија и ефикаснија пројектна решења (чему је посвећено Поглавље 6).

Табела 4.5: Основне димензије бродова испитиваних у студији [4.12]

Тест-брод	„велики“ брод	„мали“ брод
L [m]	110	80
B [m]	11.4	9
T [m]	2.6	2.6
број редова TEU по ширини	4	3
број редова TEU по висини	3, 4, 5	3, 4
број редова TEU по дужини	13	8

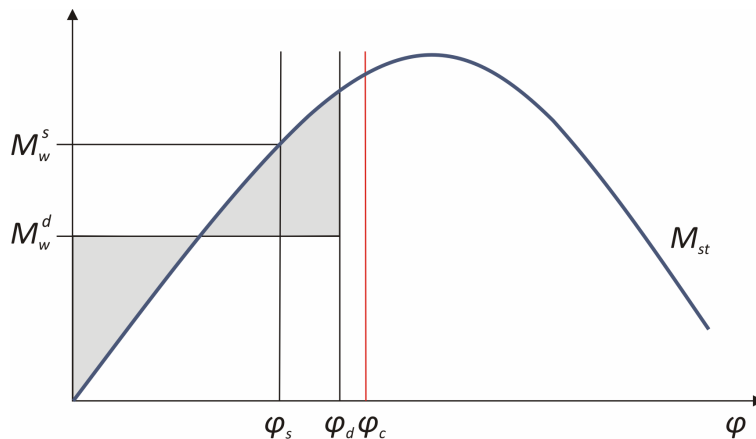
У Поглављу 2, било је речи о недоумици која се јавља при моделовању удара ветра на речни брод. Потребно је одабрати одговарајући коефицијент храпавости терена који зависи од категорије терена (видети Табелу 2.1), који се, у принципу, разликује се на појединим деоницама пловног пута. Да би се испитао утицај коефицијента храпавости, тј. утицај околине кроз коју брод пролази на сигурност, у студији [4.12] коришћене су две вредности коефицијента K : минимална 0.003 (одговара отвореном простору) и максимална 0.015 (одговара приградским насељима).

⁷ Ограничење броја редова контејнера по висини може бити последица висине мостова на пловном путу.

Пошто у Европи постоји низ различитих правила за градњу бродова унутрашње пловидбе, јавила се потреба за усаглашавањем техничких прописа, како би се омогућила неометана пловидба свим европским рекама. Задатак је поверен Радној групи за водни саобраћај Комитета за унутрашњи транспорт Економске комисије за Европу Уједињених нација (UNECE) [4.13]. (Усаглашени технички прописи, обједињени у UNECE Резолуцији 61, послужили су као основа за Директиву 2006/87/ЕС Европског парламента и Савета [4.14].)

Према прописима [4.13], речни контејнерски бродови намењени за пловидбу у Зонама 2 и 3, треба да задовоље следеће захтеве у погледу стабилитета:

- (a) Речни критеријум временских услова;
- (b) Критеријум статичког накретања под дејством ветра;
- (c) Додатне критеријуме стабилитета контејнерских бродова.



слика 4.9: UNECE прописи [4.13] о стабилитету бродова унутрашње пловидбе

Речни критеријум временских услова представља један од основних захтева прописа [4.13] који треба да задовоље сви бродови унутрашње пловидбе. Према овом критеријуму, угао динамичког накретања брода под дејством константног момента ветра одређене брзине треба да буде мањи од критичног угла накретања φ_c (слика 4.9). У неким аспектима, критеријум је сличан одговарајућем пропису Југорегистра: узима се у обзир промена брзине ветра са висином, крак момента ветра рачуна се као вертикално растојање тежишта надводне латералне површине од водне линије. Међутим, за разлику од критеријума Југорегистра, Речни критеријум временских услова из прописа [4.13] претпоставља да се брод налази у усправном положају у тренутку удара ветра и тиме узима у обзир само први удар. Критични угао накретања дефинисан је као угао продора воде кроз неосигуране отворе; међутим, критични угао не сме бити већи од угла уласка палубе у воду, или од угла изласка средине узвоја из воде. Момент ветра рачуна се према обрасцу:

$$M_{wd} = 0.001 \cdot P_{wd} \cdot A_w \cdot l_w.$$

Критеријум статичког накретања под дејством ветра треба да задовоље сви бродови чије се тежиште надводне латералне налази на висини већој од 2m од водне линије. Угао статичког накретања φ_s брода изложеног дејству константног момента ветра треба да буде мањи од 80% критичног угла накретања φ_c (слика 4.9). Иако у правилима не постоји објашњење (сасвим у духу детерминистичких прописа), прописана резерва од 20% треба да обухвати динамичко накретање услед удара ветра. Статички момент ветра рачуна се према обрасцу:

$$M_{wst} = p_w \cdot A_w \cdot (l_w + T/2),$$

где је p_w притисак ветра константне вредности у Зони 2. Нејасно је због чега се, у овом критеријуму, за разлику од критеријума временских услова, не узима у обзир промена притиска (брзине ветра) са висином.

Додатни критеријуми стабилитета контејнерских бродова садрже Методу А и Методу В које се користе равноправно, тј. треба задовољити било коју од две методе. Метода А је иста као и критеријум стабилитета контејнерских бродова у ADN прописима [4.15]. Обе методе разликују случајеве фиксираних и нефиксираних контејнера.

Метода А

- случај брода који носи нефиксиране контејнере

Минимална метацентарска висина брода је 1m. Угао накретања брода изложеног истовременом дејству момената ветра и момента који настаје услед закретања брода, треба да буде мањи од 5° , а палуба не сме да уђе у воду.

- случај брода који носи фиксиране контејнере

Минимална метацентарска висина брода је 0.5m. Угао накретања брода изложеног истовременом дејству момената ветра и момента који настаје услед закретања брода, треба да буде мањи од угла наплављивања кроз незаштићене отворе.

Метода В

- случај брода који носи нефиксиране контејнере

Минимална метацентарска висина брода је 1m. Под дејством момента ветра, брод постиже положај статичке равнотеже, а затим се динамички накреће под заједничким дејством момента ветра и момента који настаје услед закретања брода. Угао динамичког накретања брода треба да буде мањи од 5° , а палуба не сме да уђе у воду.

- случај брода који носи фиксирани контејнере

Сматра се да контејнерски брод испуњава захтеве у погледу стабилитета ако задовољава Критеријум статичког накретања под дејством ветра (и Речни критеријум временских услова, који се примењује на све бродове).

Такође, треба обратити пажњу да, за случај крцања фиксираних контејнера, Метод А предвиђа накретање до угла наплављивања кроз незаштићене отворе, а не до 5° , односно до угла под којим палуба улази у воду (као што је прописано за случај нефиксираних контејнера).

Минималне метацентарске висине (минимални нивои сигурности) одређене према критеријумима прописа [4.13], за сваки од испитиваних случајева дате су у Табелама 4.6 и 4.7. Иако између Метода А и В постоје одређене разлике (у сценарију, утицају слободних површина и закретања), минималне метацентарске висине за случај брода који носи нефиксирани контејнере разликују се врло мало. За случај крцања фиксираних контејнера, вредности MG_{min} добијене Методама А и В биле би исте када би и Метод В садржала захтев (постављен у Методи А) да метацентарска висина мора бити већа од 0.5m. Како то није случај, минималне метацентарске висине добијене два метода могу се знатно разликовати (видети податке за мали и велики брод са три реда контејнера).

Поред прописа који се непосредно односе на стабилитет, бродови треба да задовоље и захтеве у погледу минималне висине слободног бока и пражнице, што на стабилитет утиче посредно. Слободни бок F_B речних контејнерских бродова намењених за пловидбу у Зони 2, треба да буде:

$$F_B \geq 600\text{mm}$$

а укупна висина слободног бока и пражнице („растојање сигурности“) треба да буде:

$$F_B + h_c \geq 1000\text{mm}.$$

Чињеница да постоје две методе за проверу стабилитета контејнерских бродова не иде у прилог хармонизацији прописа, што би требало да буде основни циљ аутора правила [4.13]. Осим тога, разлике које постоје међу методама само додатно компликују примену правила на контејнерске бродове. Студија [4.12] садржи низ предлога за побољшање прописа [4.13]; неки од предлога проистекли су из пробабилистичке анализе кретања. Међутим, првенствени циљ анализе био је да се утврди ниво сигурности брода, који задовољава постојеће детерминистичке прописе, у временским околностима које прописи предвиђају.

Табела 4.6: Минималне метацентарске висине „великог“ брода према прописима [4.13]				
број редова контејнера	Метод А	Метод А	Метод В	Метод В
	фиксирани контејнери	нефиксирани контејнери	фиксирани контејнери	нефиксирани контејнери
5	1.15*	1.42**	1.15*	1.37**
4	0.65*	1.05**	0.65*	1
3	0.5	1	0.275*	1
* Речни критеријум временских услова ** Додатни критеријуми за контејнерске бродове				

Табела 4.7: Минималне метацентарске висине „малог“ брода према прописима [4.13]				
број редова контејнера	Метод А	Метод А	Метод В	Метод В
	фиксирани контејнери	нефиксирани контејнери	фиксирани контејнери	нефиксирани контејнери
4	0.549*	1	0.549*	1
3	0.5	1	0.26*	1
* Речни критеријум временских услова ** Додатни критеријуми за контејнерске бродове				

Нелинеарно ваљања брода под дејством удара ветра моделовано је диференцијалном **једначином 2.8**. Као што је речено у Поглављу 2, у моделу су коришћене неке претпоставке садржане у прописима [4.13]: подела момента ветра на статички и динамички део, начин одређивања крака момента ветра. Средња брзина ветра $v_w = 18\text{m/s}$ такође потиче из прописа. Добијено кретање статистички је анализирано како би се добиле вредности потребне за прорачун вероватноће делимичног губитка стабилитета. Угао наплављивања отвореног складишта одабран је за критични угао ваљања (угао делимичног губитка стабилитета). Резултати су приказани у виду пробабилистичких кривих (слике 4.10 ÷ 4.19). За сваки испитивани случај, одређена је фамилија пробабилистичких кривих која одговара различитим висинама празнице. Бродови имају минимални слободни бок одређен према прописима [4.13]. На дијаграмима су назначене вредности минималних метацентарских висина испитиваних случајева, према Методама А и В (видети Табеле 4.6 и 4.7). Сигурност коју бродови остварују комбинацијама метацентарске висине и висине празнице може се упоредити са пробабилистичким критеријумом сигурности.

На основу добијених резултата, могу се извести следећи закључци:

- У односу на претходно анализирани прописе Југорегистра [4.10], прописи UNECE [4.13] су строжији, углавном због тога што дозвољени угао накретања ограничавају на угао уласка палубе у воду (а не на угао наплављивања кроз незаштићене отворе). Због тога, прописи [4.13] показују боље слагање са пробабилистичким критеријумом.

- Међутим, слично Критеријуму временских услова за морске бродове, ни прописи [4.13] нису конзистентни са пробабилистичке тачке гледишта. Различити бродови (различитих димензија и депласмана), као и исти бродови са различитим бројем редова контејнера (различитим случајевима крцања), те бродови који се разликују по начину осигурања терета (фиксирани и нефиксирани контејнери) имају вероватноће губитка стабилитета различитог реда величине, без обзира на то што задовољавају минималне захтеве у погледу стабилитета, и тиме остварују исти ниво сигурности према детерминистичким прописима.

- Још важније, прописи [4.13] у неким случајевима не успевају да обезбеде довољну сигурност у олуји. Пробабилистичка анализа показује да се бродови, који се сматрају сигурним према постојећим детерминистичким прописима, могу наплавити и преврнути у екстремним, али реалним временским околностима.

- Средина кроз коју пролази пловни пут, изражена коефицијентом храпавости терена K , има велики утицај на динамички стабилитет брода у олуји. При истој средњој брзини ветра, бродови су мање сигурни при проласку кроз градска насеља, него при пловидби кроз равницу. Као и сви други детерминистички прописи, ни прописи [4.13] ово не узимају у обзир.

- Бродови који задовољавају минималне захтеве прописа [4.13], сигурнији су са пробабилистичке тачке гледишта ако носе нефиксиране контејнере. То је последица захтева $MG_{min} > 1m$, који је изостављен из критеријума који се односе на фиксирани контејнере.

- „Велики“ брод који задовољава минималне захтеве прописа [4.13], задовољио би пробабилистички критеријум под условом да превози нефиксиране контејнере кроз отворену равницу (Табела 4.8); у већини осталих случајева, брод има вероватноћу губитка стабилитета већу од дозвољене (нарочито ако носи фиксирани контејнере).

„Мали“ брод који задовољава минималне захтеве детерминистичких прописа, задовољио би и предложени пробабилистички пропис у већини случајева (Табела 4.9). Изузетак представљају скоро сви случајеви бродова који носе фиксирани контејнере, као и брод који носи четири реда нефиксираних контејнера кроз урбану средину. У начелу, мањи брод би лакше, уз мање корекције, успео да задовољи пробабилистички критеријум сигурности, па га можемо сматрати сигурнијим у бочној олуји.

Табела 4.8: Минималне метацентарске висине „великог“ брода са MG_{min} и h_{cmin}				
број редова контејнера	$K = 0.003$	$K = 0.003$	$K = 0.015$	$K = 0.015$
	фиксирани контејнери	нефиксирани контејнери	фиксирани контејнери	нефиксирани контејнери
5	✗	✓	✗	✗
4	✗	✓	✗	✗
3	✓*	✓	✗	✓
* ако се примени Метода А				

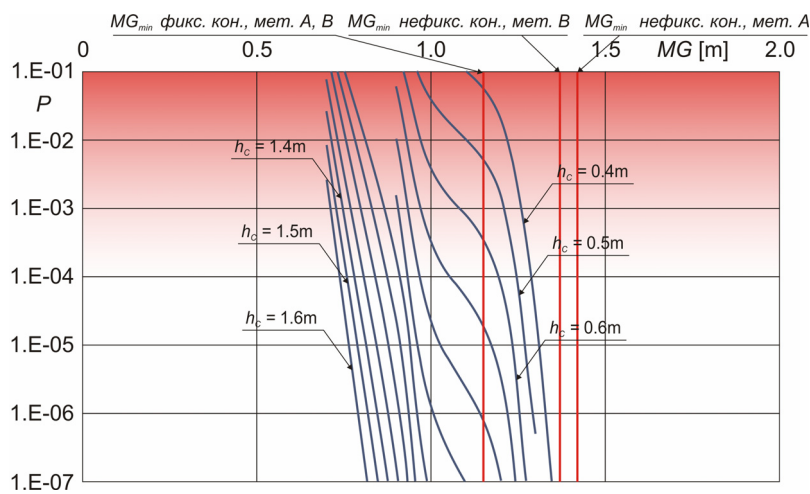
Табела 4.9: Минималне метацентарске висине „малог“ брода према прописима [4.13]				
број редова контејнера	$K = 0.003$	$K = 0.003$	$K = 0.015$	$K = 0.015$
	фиксирани контејнери	нефиксирани контејнери	фиксирани контејнери	нефиксирани контејнери
4	✓	✓	✗	✓
3	✓*	✓	✗	✓
* ако се примени Метода А				

У начелу, мањи брод би лакше, уз мање корекције, успео да задовољи пробабилистички критеријум сигурности, па га можемо сматрати сигурнијим у бочној олуји.

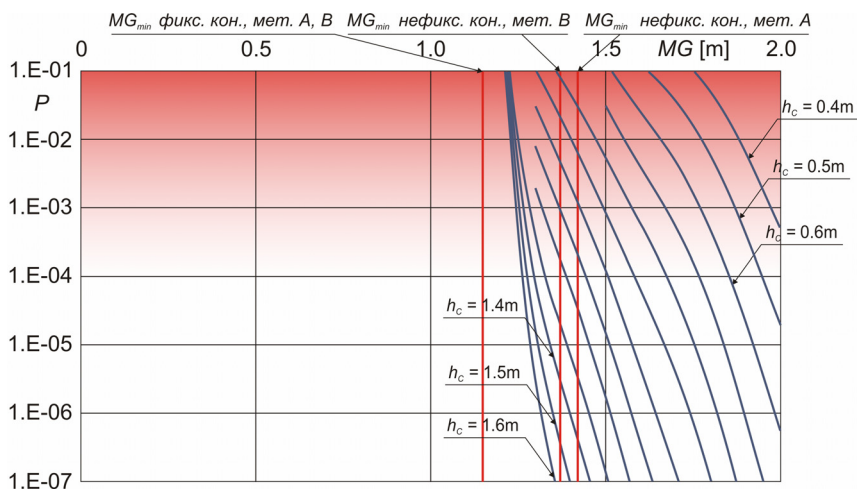
Да би предложени пробабилистички ниво сигурности био задовољен, потребно је повећати минималну метацентарску висину (Табеле 4.10 и 4.11) или минималну висину празнице (Табеле 4.12 и 4.13). Потоње је једноставније остварити, јер потребна вредност метацентарске висине у појединим случајевима достиже технички нереалне (тешко оствариве) вредности. С друге стране, у бродограђевној пракси, уобичајена висина празнице је $h_c = 1.1 \div 1.3\text{m}$, дакле, знатно виша од минимума коју предвиђају прописи [4.13]. Наиме, празница игра значајну улогу и у чврстоћи брода (као елемент уздужне чврстоће) а важна је и у погледу безбедности рада на броду (као „ограда“ гротла). Према томе, већ постојеће високе празнице, иако им то није основна намена, обезбеђују довољни ниво сигурности брода у олуји, са пробабилистичке тачке гледишта.⁸ Избор слободног бока и висине празнице, тзв. растојања сигурности (safety distance) на

⁸ Односи се на све испитиване случајеве, осим на брод који носи фиксирани контејнери, када је неопходно и значајније повећати метацентарску висину.

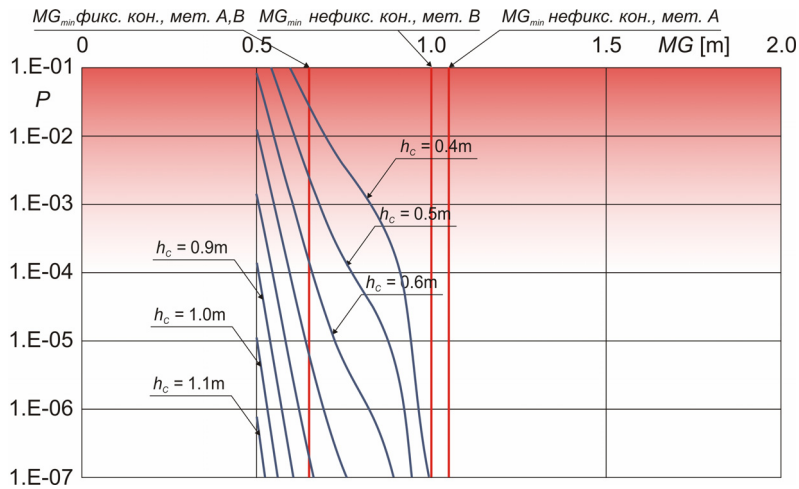
основу потребног нивоа сигурности представља пример пројектовања заснованог на ризику (risk-based design), чему је посвећено Поглавље 6. Ако угао продора воде одговара празници контејнерског гротла, онда се високом празницом може објаснити због чега се бродови унутрашње пловидбе не преврћу тако једноставно и брзо као што је првобитно показала студија [4.8]. У том смислу, подешавањем висине празнице (висине незаштићеног отвора) може се постићи захтевани ниво сигурности, што, с аспекта трошкова умањења ризика, оправдава одабрану вредност дозвољене вероватноће губитка стабилитета. Према томе, захтев за повећањем минималне висине празнице са 0.4m на 1.1m, за сада, представља очигледан начин за побољшање постојећих прописа о стабилитету.



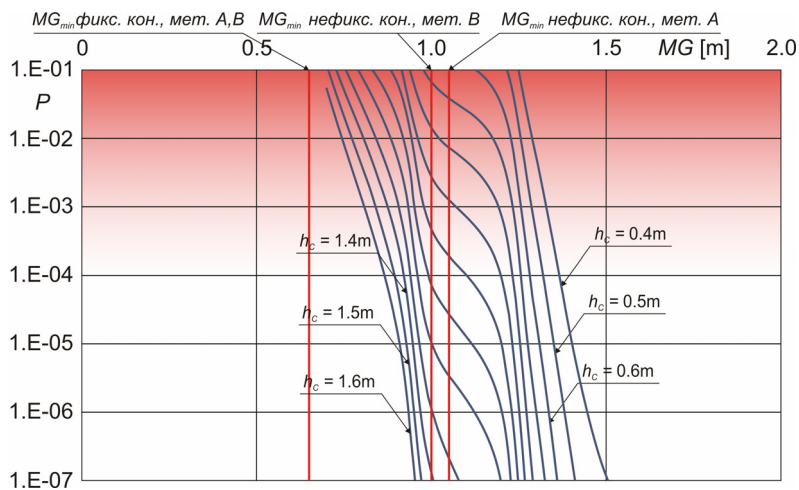
слика 4.10: Криве вероватноће наплављивања великог брода са пет редова контејнера, $K = 0.003$



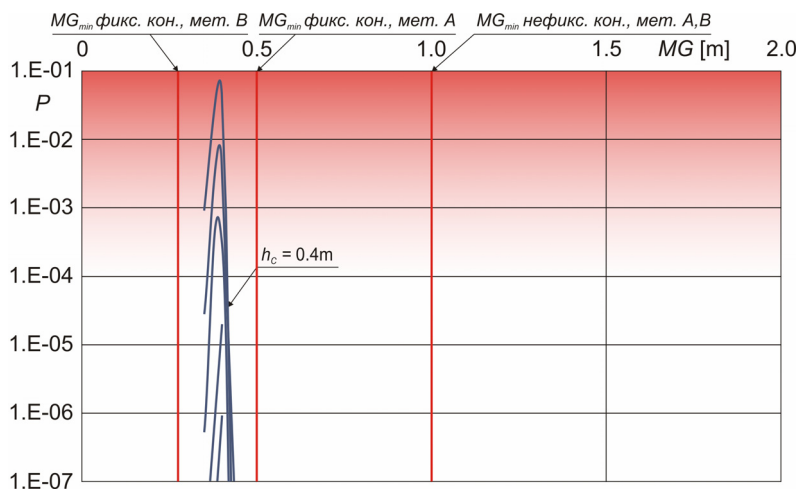
слика 4.11: Криве вероватноће наплављивања великог брода са пет редова контејнера, $K = 0.015$



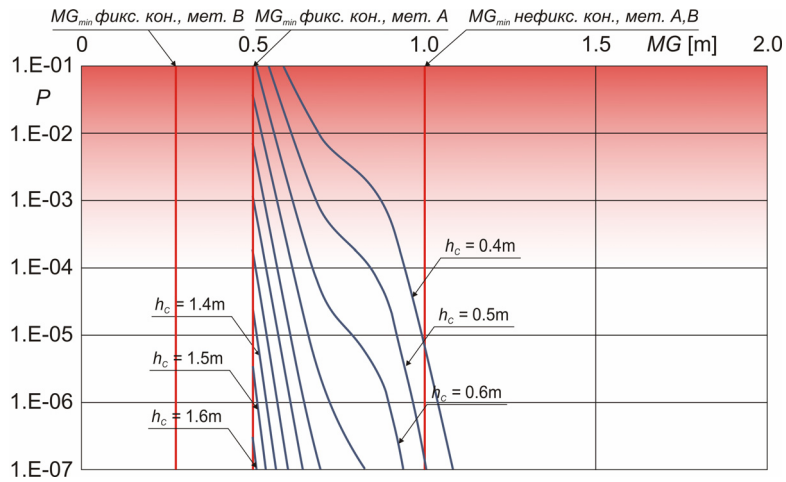
слика 4.12: Криве вероватноће наплављивања великог брода са четири реда контејнера, $K = 0.003$



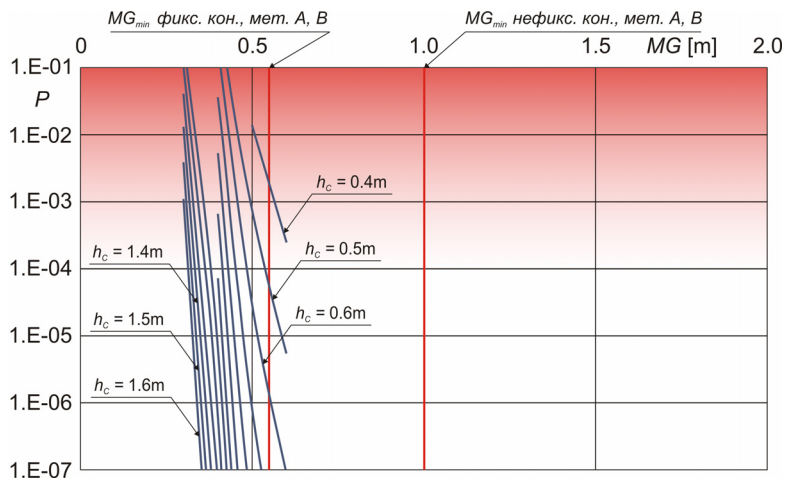
слика 4.13: Криве вероватноће наплављивања великог брода са четири реда контејнера, $K = 0.015$



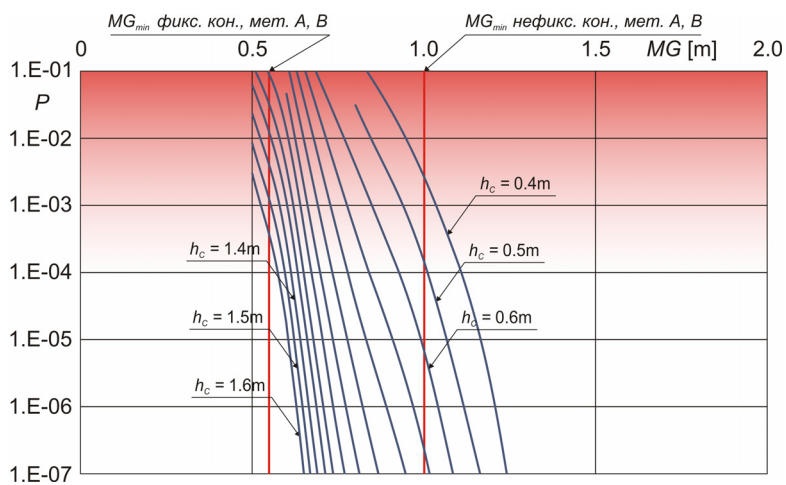
слика 4.14: Криве вероватноће наплављивања великог брода са три реда контејнера, $K = 0.003$



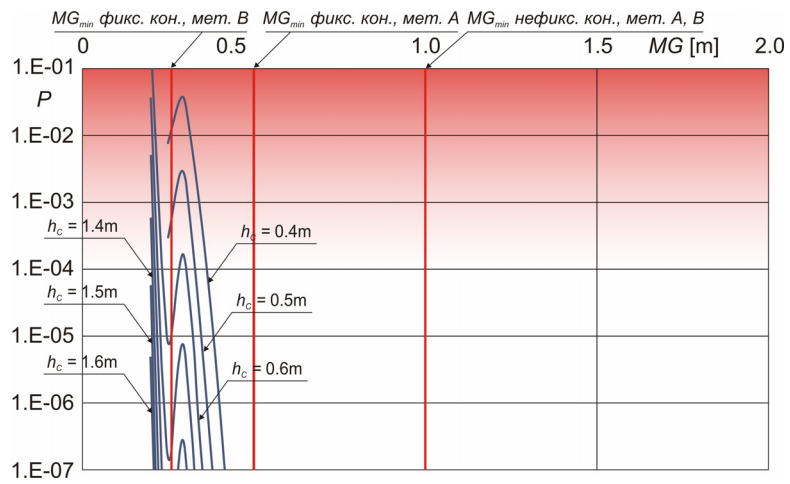
слика 4.15: Криве вероватноће наплављивања великог брода са три реда контејнера, $K = 0.015$



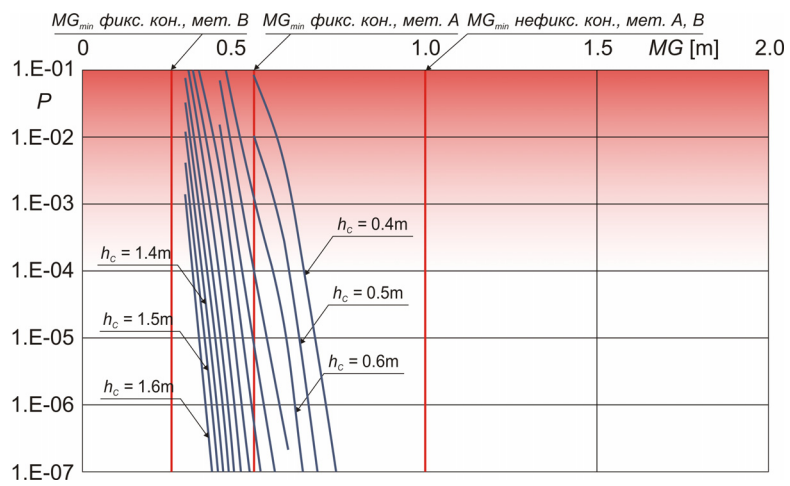
слика 4.16: Криве вероватноће наплављивања малог брода са четири реда контејнера, $K = 0.003$



слика 4.17: Криве вероватноће наплављивања малог брода са четири реда контејнера, $K = 0.015$



слика 4.18: Криве вероватноће наплавлjивања малог брода са три реда контејнера, $K = 0.003$



слика 4.19: Криве вероватноће наплавлjивања малог брода са три реда контејнера, $K = 0.015$

Табела 4.10: Потребно повећање MG „великог“ брода како би се постигао ниво P_{req}^*				
број редова контејнера	$K = 0.003$ фиксирани контејнери	$K = 0.003$ нефиксирани контејнери	$K = 0.015$ фиксирани контејнери	$K = 0.015$ нефиксирани контејнери
5	$MG > 1.25m$		$MG > 1.9m$	$MG > 1.9m$
4	$MG > 0.8m$		$MG > 1.3m$	$MG > 1.3m$
3			$MG > 0.9m$	
* при $h_{cmin} = 0.4m$				

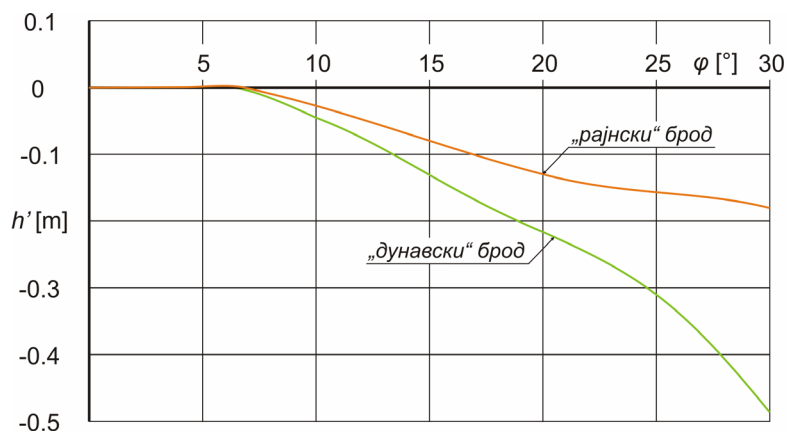
Табела 4.11: Потребно повећање MG „малог“ брода како би се постигао ниво P_{req}^*				
број редова контејнера	$K = 0.003$ фиксирани контејнери	$K = 0.003$ нефиксирани контејнери	$K = 0.015$ фиксирани контејнери	$K = 0.015$ нефиксирани контејнери
4			$MG > 1m$	
3			$MG > 0.6m$	
* при $h_{cmin} = 0.4m$				

Табела 4.12: Потребно повећање h_c „великог“ брода како би се постигао ниво P_{req}^*				
број редова контејнера	$K = 0.003$ фиксирани контејнери	$K = 0.003$ нефиксирани контејнери	$K = 0.015$ фиксирани контејнери	$K = 0.015$ нефиксирани контејнери
5	$h_c > 0.55m$		немогуће	$h_c > 1m$
4	$h_c > 0.55m$		немогуће	$h_c > 0.9m$
3			$h_c > 1.2m$	
* при MG_{min}				

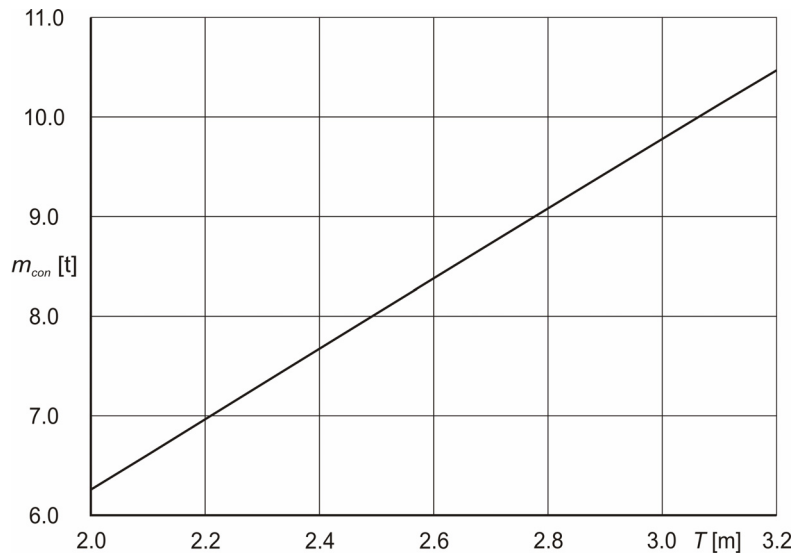
Табела 4.13: Потребно повећање h_c „малог“ брода како би се постигао ниво P_{req}^*				
број редова контејнера	$K = 0.003$ фиксирани контејнери	$K = 0.003$ нефиксирани контејнери	$K = 0.015$ фиксирани контејнери	$K = 0.015$ нефиксирани контејнери
4			$h_c > 1.5m$	
3			$h_c > 0.6m$	
* при MG_{min}				

Пројектовани газ бродова унутрашње пловидбе условљен је дубином пловног пута. Дубина европских река разликује се и мења дуж тока, због чега је пројектовани газ контејнерских бродова намењених пловидби Рајном значајно већи од газа бродова који би били пројектовани нпр. за доњи ток Дунава. Пробабалистичка анализа Критеријума временских услова (Део 4.1) показала је да детерминистички прописи не успевају да обезбеде једнак ниво сигурности у олуји бродовима различитих димензија и депласмана. Пошто би правила [4.13] требало да важе на свим унутрашњим пловним путевима Европе, намеће се питање да ли се применом ових детерминистичких прописа постиже исти ниво сигурности (вероватноћа губитка стабилитета истог реда величине) код свих (контејнерских) бродова, без обзира на разлике у пројекту условљене карактеристикама пловног пута. Осим тога, с обзиром да промена газа утиче на стабилитет брода, питамо се какав је утицај пројектованог газа на сигурност брода у олуји? Због тога је пробабалистичка анализа спроведена на тест-бродовима једнаке дужине, ширине, слободног бока и броја контејнера, али различитог пројектованог газа и, самим тим, депласмана. Резултати овог дела истраживања дати су у студији [4.16].

Приказани резултати односе се на тзв. **дунавски** брод (газа 2.1m) и **рајнски** брод (газа 3.1m). Бродови су једнаке дужине 110m, ширине 11.4m и слободног бока 0.6m, имају отворено складиште и задовољавају минималне захтеве у погледу стабилитета према прописима [4.13]. Криве крака додатног стабилитета бродова дате на слици 4.20. Криве додатног стабилитета бродова чији је пројектовани газ унутар опсега 2.1m ÷ 3.1m, налазе се између ових крајњих кривих. Ако су бродови пројектовани тако да носе исти максимални број TEU јединица (четири реда по ширини, пет по висини и 13 по дужини), онда бродови мањег газа носе лакше контејнере. Зависност просечне масе контејнера од пројектованог газа одређена у раду [4.17] приказана је на слици 4.21. Претпостављено је да се бродови ваљају и заносе (али остају на средњој трајекторији) под дејством налета ветра средње брзине 18m/s. Кретање бродова моделовано је **системом једначина 2.10**. Нелинеарно пригушење ваљања одређено је Икедином методом, уз претпоставку да бродови напредују брзином 16km/h.



слика 4.20: Анализа UNECE прописа: криве крака додатног стабилитета дунавског и рајнског брода



слика 4.21: Просечна маса контејнера у функцији газе брода дужине 110m, ширине 11.4m, са 5 редова контејнера по висини [4.17]

Резултати нумеричких експеримената приказани су кривама вероватноће наплављивања складишта у функцији метацентарске висине (слика 4.22). Дате су криве за различите висине пражнице. Резултати показују да брод мањег газе (дунавски брод) има већу вероватноћу губитка стабилитета, тј. ако је:

$$h_c(\text{дунавског брода}) = h_c(\text{рајнског брода}) \text{ и}$$

$$MG(\text{дунавског брода}) = MG(\text{рајнског брода})$$

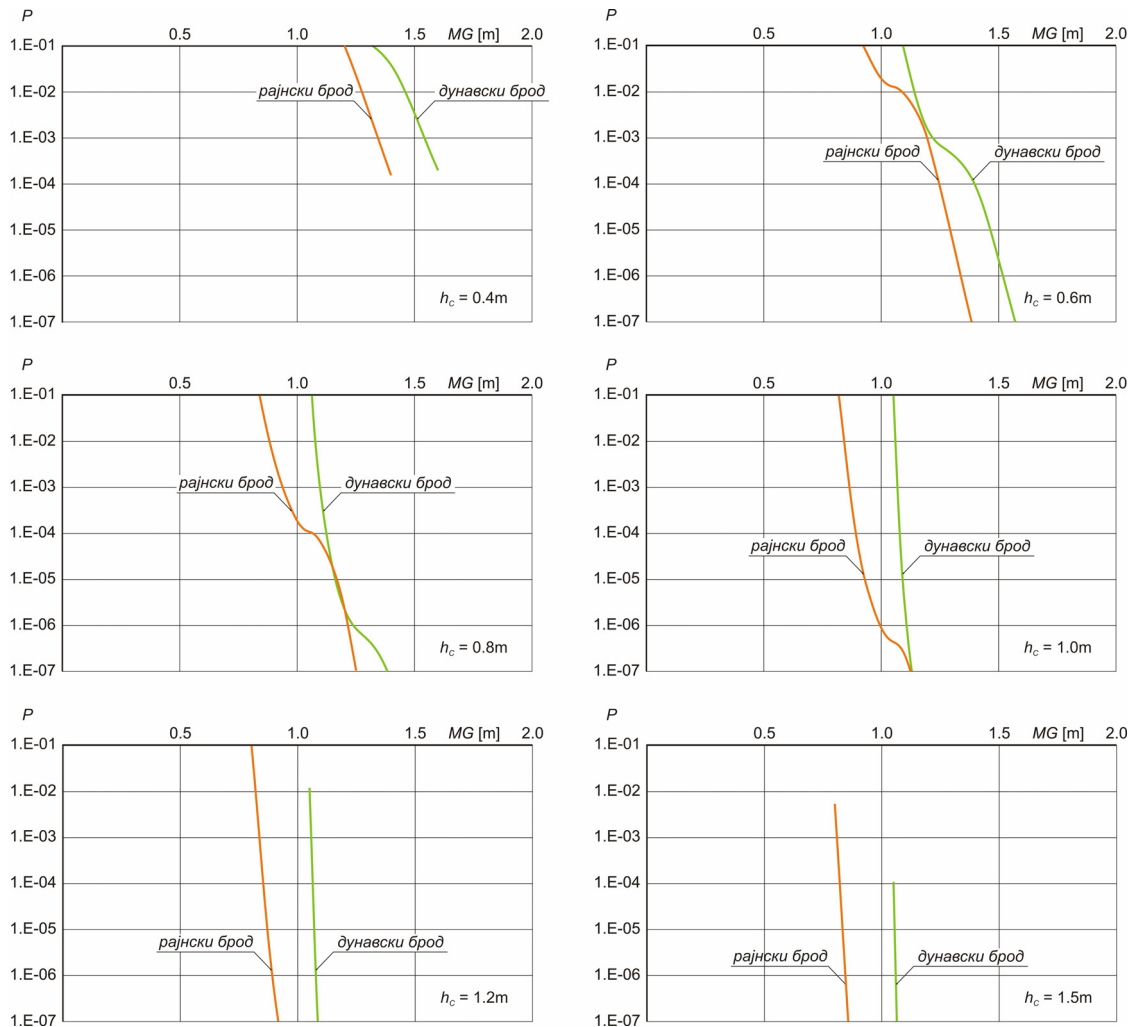
онда је:

$$P_{fl}(\text{дунавског брода}) > P_{fl}(\text{рајнског брода}),$$

без обзира на висину пражнице. Разлика између добијених вероватноћа губитка стабилитета испитиваних бродова мења се са променом метацентарске висине и висине пражнице, али некада је суштинска. Нпр. ако оба брода имају пражницу висине 0.8m и метацентарску висину око 1.05m, вероватноћа наплављивања дунавског брода је недопустиво висока $O(10^{-1})$, па се брод не може сматрати сигурним у бочној олуји. У истим условима, вероватноћа наплављивања рајнског брода је $O(10^{-4})$, па се овај брод може сматрати сигурним.

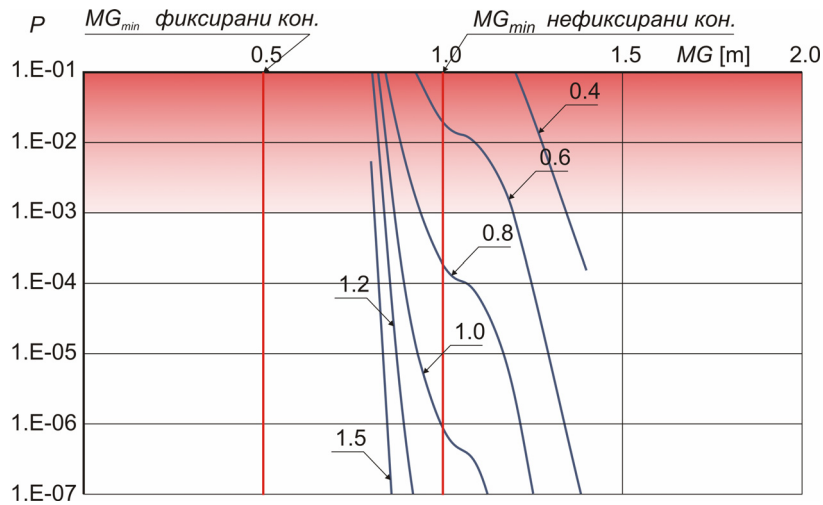
Разлике у сигурности испитиваних бродова могу се исказати и другачије: дунавски брод (брод мањег газе) остварује исти ниво сигурности (исту вероватноћу наплављивања) као и рајнски брод, ако има метацентарску висину већу и до 0.3m.

Ако је максимални број контејнера који носе бродови исти, брод мањег газе има већу латералну површину изложену ветру и већи крак момента ветра, услед чега се повећава момент ветра. Ипак, ови утицаји нису довољно велики да би значајније утицали на сигурност. Међутим, брод мањег газе има и значајно мањи депласман, због чега се смањује момент стабилитета. Испоставља се да управо смањење депласмана има пресудан утицај на сигурност брода.

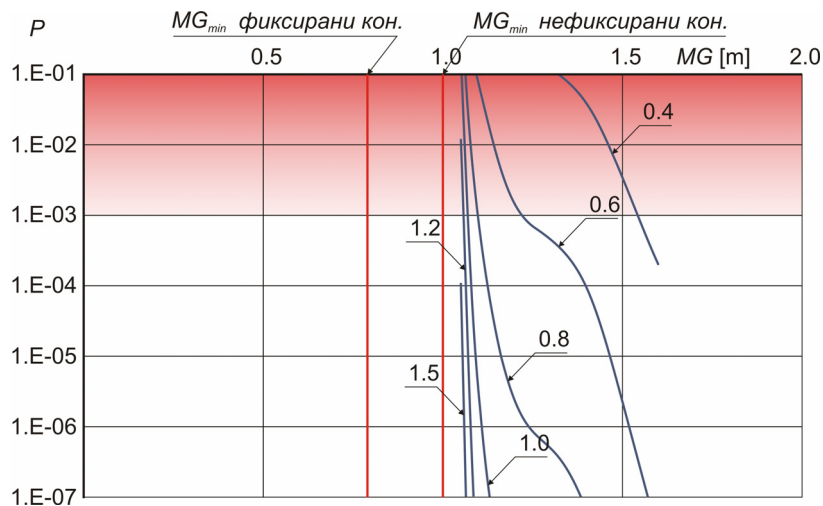


слика 4.22: Криве вероватноће наплављивања рајнског и дунавског брода, за различите висине пражнице

Дакле, пробабилистички приступ сигурности показао је да се вероватноћа губитка стабилитета мења у зависности од пројектованог газа. Преостало је да се испита да ли и детерминистички прописи, на одговарајући начин, узимају у обзир утицај пројектованог газа на стабилитет. Дијаграми на слици 4.23 и 4.24 приказују фамилије пробабилистичких кривих за испитивани опсег висина пражнице, за рајнски и дунавски брод, респективно. На дијаграмима су означене минималне метацентарске висине за случајеве када брод носи фиксиране односно нефиксиране контејнере, према прописима [4.13]. Када је рајнски брод у питању, детерминистички прописи ни у ком случају не успевају да обезбеде довољну сигурност броду изложеном бочном олујном ветру, ако носи фиксиране контејнере. Ако пак рајнски брод носи нефиксиране контејнере, онда се потребан ниво сигурности постиже са прописаном минималном метацентарском висином, под условом да је висина пражнице већа од 0.7m (односно најмање 0.3m већа од прописаног минимума).



слика 4.23: Фамилија кривих вероватноће наплављивања рајнског брода за различите висине пражнице – поређење са захтевима прописа [4.13]



слика 4.24: Фамилија кривих вероватноће наплављивања дунавског брода за различите висине пражнице – поређење са захтевима прописа [4.13]

Поређење пробабилистичких резултата дунавског брода са захтевима прописа [4.13] показује да се брод који задовољава детерминистичка правила не може сматрати сигурним, без обзира на то да ли су контејнери фиксирани или не. У овом случају, повећање минималне пражнице није довољно, већ би требало повећати минималну метацентарску висину бар за 0.1m (ако брод носи нефиксиране контејнере) односно 0.3m (ако су контејнери фиксирани). Имајући у виду да се транспорт контејнера унутрашњим пловним путевима у Европи углавном одвија на Рајни (што значи да је пројектовани газ бродова већи од 3m), да је уобичајена висина пражнице контејнерских бродова бар 1m, те да бродови носе махом нефиксиране контејнере, намеће се закључак да су прописи [4.13] „скројени“ према постојећим рајнским контејнерским бродовима. Пробабилистичка анализа,

међутим, показује да прописи [4.13] једино и одговарају постојећим контејнерским бродовима већег газа, какви су рајнски бродови, док би контејнерски бродови мањег газа пројектовани у складу са овим правилима могли бити у озбиљној опасности.

4.3 Анализа пробабилистичких прописа о стабилитету бродова намењених за приобалну пловидбу

У овом раду, термин „бродови намењени за приобалну пловидбу“ (estuary ships) односи се на бродове који саобраћају у приобалном подручју Белгије – обично између морске луке Зибрухе (Zeebrugge) и широког, западног огранка ушћа Схелде (Westerschelde). У питању су речни бродови који имају дозволу да исплове на море, ако задовољавају одређене техничке захтеве, а временске прилике се могу сматрати „повољним“. Прве прописе којима је регулисана приобална пловидба белгијске поморске власти издале су још 1962. У пракси, ови прописи су ограничавали пловидбу на ветар јачине 5 Бофора и таласе значајне висине 1.2m [4.18]. Временом, прописи су постали сувише рестриктивни у односу на потребе за приобалном пловидбом, која је била спречена већим делом године. Како би поспешиле приобалну пловидбу и учиниле је ефикаснијом и сигурнијом, белгијске поморске власти, у сарадњи са Лојд Регистром, издале су нове прописе [4.19] током 2007. године. Први брод саграђен у складу са новим правилима, брод за превоз контејнера Амберес, започео је пловидбу на редовној линији Зибрухе-Антверпен већ у јануару 2008.

Проблем кретања (превасходно) речног брода на таласима сам по себи довољно је занимљив за пробабилистичку анализу. Проблем још занимљивијим чини то што је у питању контејнерски брод, који би могао бити осетљив и на ударе ветра. Међутим, пажњу највише привлачи иновативни концепт нових прописа о градњи бродова намењених за приобалну пловидбу. Наиме, прописи [4.19] садрже низ одредби којима се регулише „понашање брода на таласима“ тако што се ограничава дозвољена вероватноћа критичног догађаја: заливања палубе, критичног угла ваљања, појаве слеминга, итд. Дакле, у питању су пробабилистички прописи, који узимају у обзир кретања релевантна за стабилитет и чврстоћу брода на таласима. Правила су направљена у складу са идејом GBS прописа: бродови треба да задовоље циљ – одређени ниво сигурности изражен вероватноћом критичног догађаја – али начин на који циљ треба да буде задовољен није прописан. Уједно, ово су први пробабилистички прописи о стабилитету брода на таласима који су у употреби.

Циљ прописа је да поставе горњу границу временских услова, изражену значајном висином таласа, у којима се разматрани брод може сматрати сигурним. Брод се сматра сигурним, уколико је дугорочна вероватноћа критичног догађаја мања од дозвољене вредности. Сматра се да је радни век брода 20 година, а да брод обави 300 повратних путовања годишње. Када је у питању ваљање брода (стабилитет брода на таласима, према [4.20]), прописи дефинишу следећи критеријум:

„Вероватноћа да угао ваљања брода буде већи од 67% угла наплављивања (кроз незаштитене отворе) или угла који одговара максимуму криве стабилитета не сме бити већа од једном током радног века; у сваком случају, угао ваљања не сме бити већи од 15°.“

Правилима је одређен и поступак којим се прорачунава вероватноћа накретања до критичног угла ваљања. За све релевантне правце простирања таласа, треба одредити преносне функције ваљања брода. Помоћу преносних функција, спектри ваљања брода одређују се за серију спектра таласа са кораком значајне висине до 0.05m. Спектри таласа, који се могу користити у прорачуну потребном за добијање пловидбене дозволе у приобалном подручју, добијени су на основу мерења обављених на релевантном месту на Северном мору; Трајенсов спектар [4.18], коришћен у овом испитивању, један је од спектра који се могу употребити у те сврхе. Из сваког спектра ваљања, добијају се статистичке величине помоћу којих се прорачунава вероватноћа критичног угла ваљања, која одговара одређеној значајној висини таласа, односно малом опсегу значајних висина. Сабирањем вероватноћа које одговарају узастопним интервалима значајне висине таласа (почевши од најнижих таласа и идући ка вишим) добија се тзв. кумулативна вероватноћа накретања до критичног угла. Кумулативна вероватноћа за одређену висину таласа представља укупну вероватноћу да ће доћи до критичног догађаја на свим таласима нижим од, и једнаким одабраној вредности H_s . Максималне и минималне вредности (кондиционалне) вероватноће, приказане у студијама [4.18] и [4.21], одговарају појединачним, респективно најопаснијим и најмање опасним, комбинацијама значајне висине и периода таласа; „прави“ показатељ је просечна вероватноћа у датом кораку значајних висина таласа.

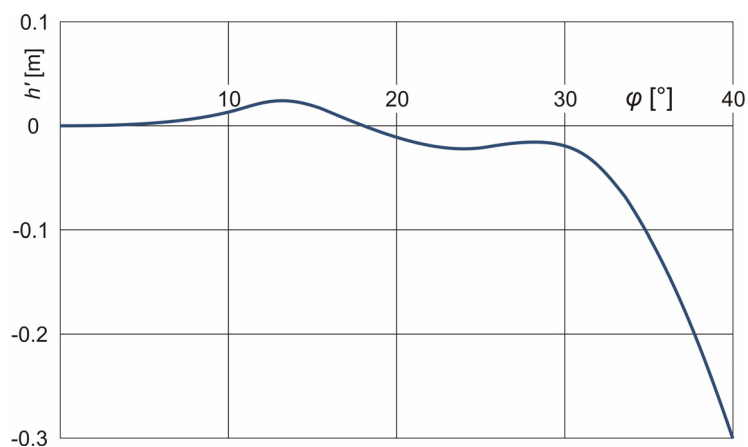
Иако су прописи [4.19] по природи пробабилистички, заснивају се на линеарном прорачуну кретања на таласима. Осим тога, прописи не узимају у обзир стохастичко дејство ветра. Утицај ветра узима се у обзир посредно, преко резерве од 33% при прорачуну амплитуде ваљања. Ова резерва би требало да обухвати додатно динамичко накретање брода услед удара ветра [4.18]. Поред пробабилистичких, бродови намењени за приобалну пловидбу треба да задовоље и детерминистички Критеријум временских услова, преко којег се такође (делимично) узима у обзир утицај ветра.⁹

Имајући у виду све што је до сада речено у вези пробабилистичког приступа сигурности брода у олуји, намеће се низ питања. Да ли је употреба линеарних једначина адекватна у случају прорачуна делимичног губитка стабилитета? Да ли је предвиђена резерва (33%) довољна? Да ли постоје случајеви у којима је резерва

⁹ Иако примена детерминистичког Критеријума временских услова заједно са пробабилистичким прописима делује непотребно и анахроно, аутори прописа (вероватно) нису смели да га изоставе. Мада још увек има статус препоруке, већина националних регулаторних и контролних тела (flag states) и класификационих друштава сматра га обавезним.

сувише велика? Да ли Критеријум временских услова доприноси сигурности брода или омета примену пробабилистичких прописа?

Пробабилистичка анализа прописа [4.19] урађена је на примеру кретања контејнерског брода, чије карактеристике одговарају броду Амберес, под дејством бочног ударног ветра и бочних нерегуларних таласа. Испитивани брод дугачак је 134m, широк 14.5m, има газ 3.8m и складиште намењено превозу (највише) 134 TEU контејнера. Контејнери су распоређени у 17 редова по дужини, пет редова по ширини и пет редова по висини, при чему је просечна маса контејнера 11t. Предвиђено је да брод има празницу висине 1m, чему одговара угао наплављивања складишта 22°. Крива крака додатног стабилитета испитиваног брода дата је на слици 4.25.



слика 4.25: Крива крака додатног стабилитета испитиваног брода за приобалну пловидбу

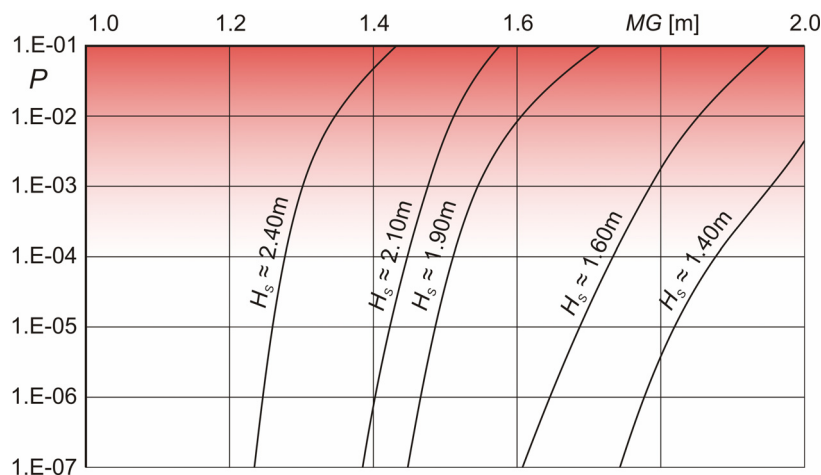
Кретање брода који се ваља и слободно заноси, моделовано је **системом једначина 2.11**. Што се тиче ветра, разматрана су два случаја. Једна серија нумеричких експеримената изведена је за случај потпуно развијених таласа (fully developed seas), када је средња брзина ветра везана за значајну висину таласа у складу са препорукама за Бретшнајдеров спектар таласа [4.23]:

$$\bar{v}_w = f(H_s)$$

У другом случају, средња брзина ветра била је независна од висине таласа, пошто брод може да искуси јаке ударе ветра и пре него што се таласи развију [4.24]. Оваква ситуација – када су ветрови јаки, а таласи још увек мали – нарочито би одговарала случају када ветар дува са копна ка мору. Уз помоћ одговарајућег модела нелинеарног ваљања, пробабилистичком анализом могуће је обухватити низ различитих ситуација са којима се брод може сусрести. Ова „флексибилност“ пробабилистичког приступа током истраживања посебно је дошла до изражаја при анализи поморске несреће брода Кугер Ејс (*Cougar Ace*) [4.25], о чему ће бити речи у Поглављу 5.

Пробабилистички поступак провере сигурности прописан правилима [4.19] заснива се дугорочној статистици критичних догађаја. Анализа развијена током истраживања представљеног у овом раду користи резултате краткорочне статистике. Чини се да би процена сигурности заснована на краткорочној анализи боље одговарала постављеним циљевима прописа, нарочито у ситуацији када капетан треба да донесе непосредну одлуку да ли испловити у датим временским условима. Краткорочна анализа омогућава да се утицај стохастички променљивог ветра на непосредан начин узме у обзир. Ипак, да би могла да се успостави веза између приступа, усвојен је ниво дозвољеног ризика $P_{req} = O(10^{-4})$, што приближно одговара вероватноћи догађаја „једном у радном веку“ из прописа [4.19], под претпоставком да путовање траје пар сати.

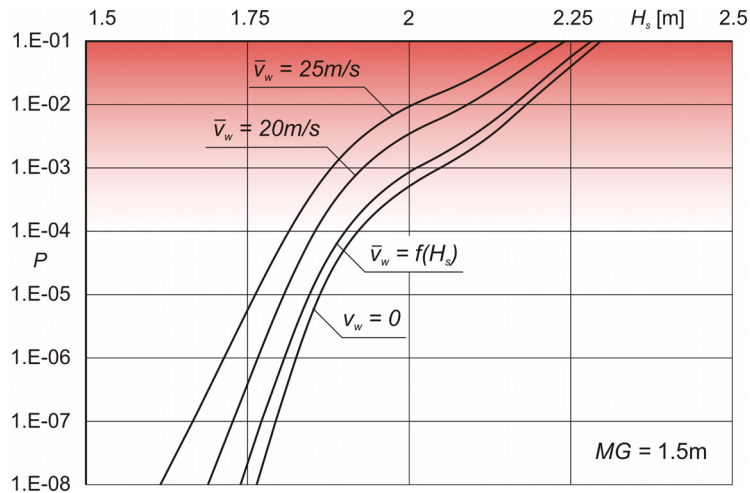
Као и у претходним случајевима, резултати анализе приказани су кривама вероватноће. Слика 4.26 приказује зависност вероватноће наплављивања од метацентарске висине, за опсег значајних висина таласа ($H_s = 1.4\text{m} \div 2.4\text{m}$). Средња брзина ветра одговара потпуно развијеним таласима према поменутиим препорукама за Бретшнајдеров спектар таласа. Видимо да се повећањем метацентарске висине за око 0.6m, горња граница сигурне пловидбе, изражена значајном висином таласа, спушта за око 1m.



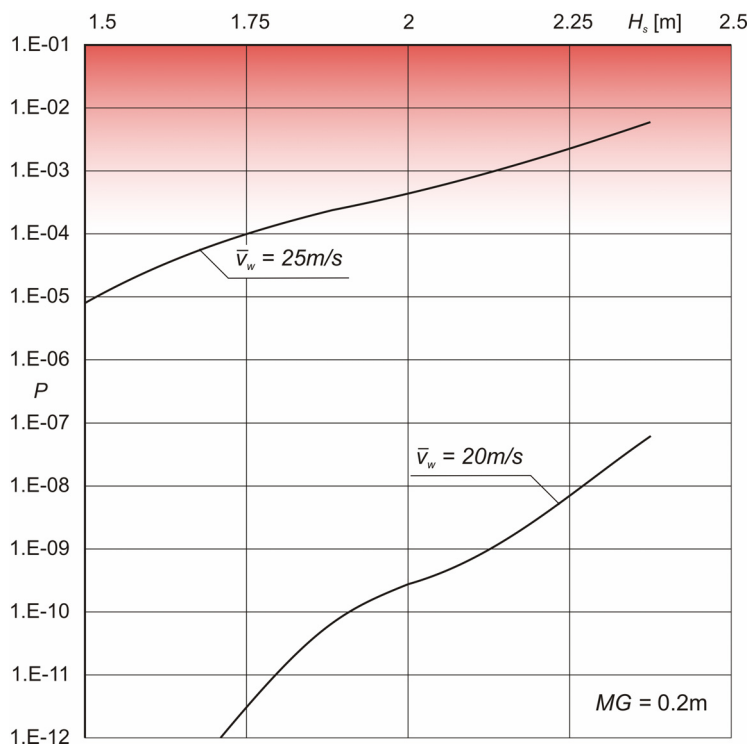
слика 4.26: Вероватноћа наплављивања у функцији метацентарске висине, за различите H_s

Резултати анализе утицаја ветра на вероватноћу наплављивања брода са великом метацентарском висином ($MG = 1.5\text{m}$) приказани су на слици 4.27. Иако утицај ветра на сигурност није занемарљив, вероватноћа губитка стабилитета повећава се највише за три реда величине при олујном ветру средње брзине 25m/s , у односу на случај када ветра уопште нема. При већим значајним висинама таласа, утицај ветра се још више смањује, па разлике у вероватноћи наплављивања за опсег брзина ветра $0-25\text{m/s}$ нису веће од једног реда величине. У овом случају, дејство таласа је много значајније. Међутим, пробабилистички резултати брода са малом метацентарском висином (слика 4.28) указују на далеко већи утицај ветра. Брод, чија је метацентарска висина 0.2m , може се сматрати сигурним у испитиваном опсегу значајних висина таласа, ако је изложен налетима бочног

ветра средње брзине 20m/s. Али, ако се средња брзина ветра повећа за свега 5m/s, вероватноћа наплављивања повећава се за пет до седам редова величине! Утицај ветра је много значајнији, док се утицај таласа смањује.



слика 4.27: Утицај ветра на вероватноћу наплављивања – пример велике метацентарске висине

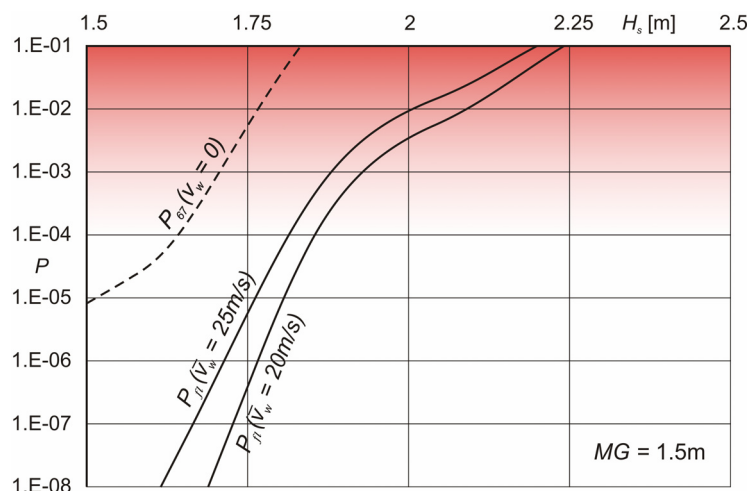


слика 4.28: Утицај ветра на вероватноћу наплављивања – пример мале метацентарске висине

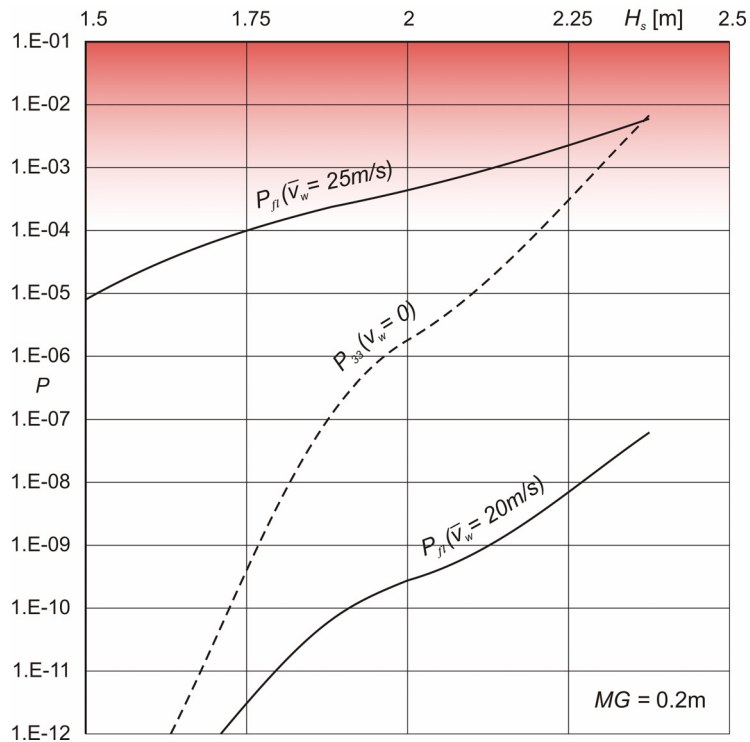
Према томе, док прописи [4.19] предвиђају константну вредност резерве од 33%, како би утицај ветра посредно био узет у обзир, мера динамичког дејства ветра на сигурност брода заправо се мења са променом метацентарске висине.

Због тога, било је важно испитати у којој мери предвиђена резерва заиста доприноси сигурности. Пробабалистичким алатима одређена је вероватноћа да ће брод достићи 67% угла наплављивања (14.7° , у испитиваном случају), али без утицаја ветра (крива P_{67} слици 4.29) и упоређена са вероватноћом наплављивања за различите брзине ветра. Ако је метацентарска висина велика, предложена резерва је исувише висока. Иако се брод може сматрати сигурним и при врло снажним, олујним ветровима, добијена вероватноћа P_{67} не одражава реално стање, па је приобална пловидба непотребно ограничена на ниже значајне висине таласа. Примера ради, брод изложен дејству бочних таласа значајне висине $H_s \approx 1.8\text{m}$, може се сматрати сигурним чак и при ударима врло снажног бочног ветра средње брзине 25m/s . Ако се, пак, примени препоручена резерва од 33%, а ветар не узме у обзир, критична вероватноћа постаје много већа од дозвољене. У конкретном случају, када је $MG = 1.5\text{m}$, резерва прописана правилима [4.19] ограничила би пловидбу на таласе $0.2\text{-}0.25\text{m}$ ниже него што је реално.

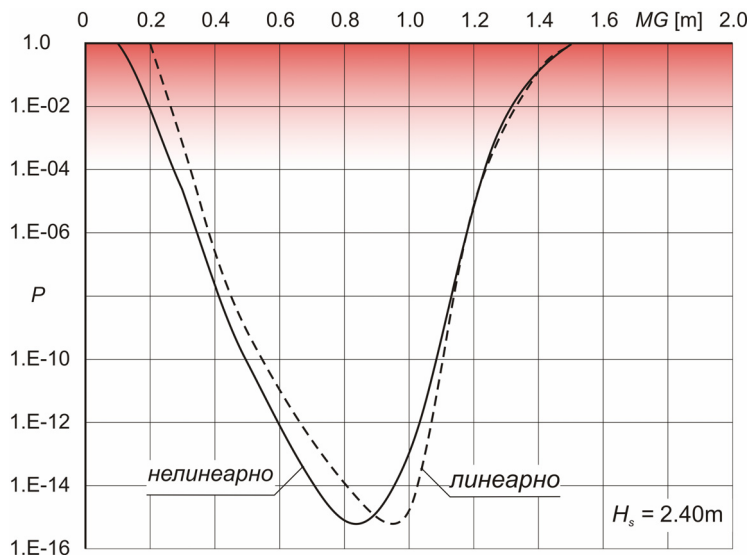
У случају када је метацентарска висина мала ($MG = 0.2\text{m}$), ситуација је обрнута. Када се примени прописана резерва, без утицаја ветра, добијена вероватноћа је $P_{67} = O(10^{-16})$, што значи да је брод сигуран у целом опсегу испитиваних значајних висина таласа, без обзира на брзину ветра. Међутим, крива вероватноће наплављивања за брзину ветра 25m/s показује да се брод не може сматрати сигурним при таласима $H_s > 1.75\text{m}$. Чак и ако бисмо применили двоструко већу резерву, и дозвољено ваљање брода ограничили на 33% угла наплављивања, тј. на 7.3° (крива P_{33} слици 4.30) то не би било довољно да се обезбеди потребна сигурност. Дакле, утицај стохастички променљивог ветра на динамички стабилитет брода сувише је сложен да би могао бити представљен приближним поступком који се користи у прописима [4.19]. Да би прописи обезбедили довољну сигурност и повећану ефикасност приобалне пловидбе, дејство ветра треба узети у обзир на одговарајући начин, као једну од спољашњих сила у диференцијалној једначини кретања брода.



слика 4.29: Упоређење вероватноће наплављивања и вероватноће P_{67}



слика 4.30: Упоредње вероватноће наплавлјивања и вероватноће P_{33}



слика 4.31: Упоредње резултата добијених нелинеарним и линеаризованим моделом

Пробабалистички приступ сигурности, предложен у овом раду, заснива се на нелинеарним моделима кретања брода. Аутори прописа [4.19] занемарују нелинеарности и ослањају се на линеарне једначине како би израчунали кретања брода на таласима. Анализа прописа [4.19] делимично је обухватила и утицај нелинеарности на кретање бродова за приобалну пловидбу, како би се утврдила

исправност линеарне апроксимације. У том циљу, нелинеарни модел кретања линеаризован је тако што је момент стабилитета, иначе представљен полиномом великог степена, сведен на момент почетног стабилитета:

$$M_{st}(\varphi) = gD \cdot \overline{MG} \cdot \varphi$$

Поређење резултата добијених нелинеарним и линеаризованим моделом представљено је на слици 4.31. Приказане су криве вероватноће наплављивања добијених помоћу два модела, на таласима $H_s = 2.4\text{m}$ и при ветру средње брзине 25m/s . Очигледно, разлике нису велике, што се и могло очекивати, с обзиром да средње амплитуде ваљања испитиваног брода не прелазе 7° . Утицај нелинеарности израженији је у подручју малих метацентарских висина, када је вероватноћа наплављивања добијена линеаризованим моделом до два реда величине већа од одговарајућег нелинеарног резултата. Применом линеарног модела добијају се $0.05\text{-}0.1\text{m}$ веће метацентарске висине, за исти ниво сигурности. При већим метацентарским висинама, утицај нелинеарности је занемарљив.

Пробабилистички прописи намењени бродовима за приобалну пловидбу у примену уводе још један занимљив концепт, који би могао утицати на правац развоја нових прописа. Прописи [4.19] захтевају одређени ниво сигурности у временским условима који одговарају предвиђеној путањи брода, а не у „универзалним“ условима, каква је нпр. олуја Критеријума временских услова.

4.4 Литература

- 4.1 Resolution A.562(14) "Recommendation on a severe wind and rolling criterion (weather criterion) for the intact stability of passenger and cargo ships of 24 metres in length and over", International Maritime Organization, 1985.
- 4.2 Resolution MSC.267(85) "Adoption of the International Code On Intact Stability, 2008 (2008 IS CODE)", Maritime Safety Committee, 4 December 2008.
- 4.3 Francescutto, A., "Intact Ship Stability – The Way Ahead", Proceedings of the 6th International Ship Stability Workshop, Webb Institute, 2002.
- 4.4 Vassalos, D., Jasionowski, A., Cichowicz, J., "Weather Criterion – Questions and Answers", Proceedings of the 8th International Ship Stability Workshop, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales, 2003.
- 4.5 Максић, И., „Анализа ИМО критеријума за стабилитет брода“, Дипломски рад, Машински факултет Универзитета у Београду, Београд, 2004.
- 4.6 "Review of the Intact Stability Code – Remarks Concerning the Weather Criterion", Submitted by Germany, IMO Sub-Committee on Stability and Load Lines and on Fishing Vessels Safety, 45th Session, Agenda Item 6, 18 April 2002.
- 4.7 "Review of the Intact Stability Code – Weather Criterion for Large Passenger Ships", Submitted by Italy, IMO Sub-Committee on Stability and Load Lines and on Fishing Vessels Safety, 45th Session, Agenda Item 6, 14 May 2002.
- 4.8 Hofman M., Bačkalov I., "Weather Criterion for Seagoing and Inland Vessels – Some New Proposals", Proceedings of International Conference on Marine Research and Transportation, 8 '05, University of Naples "Federico II", 2005, pp. 53-62.
- 4.9 Det Norske Veritas, "Risk Evaluation Criteria", SAFEDOR Project Public Report, 2007.
- 4.10 Југословенски регистар бродова, „Правила за градњу бродова унутрашње пловидбе“, Београд, 1994.
- 4.11 Russian River Register, "Rules for the Classification and Construction of Inland Navigation Ships", St. Petersburg.
- 4.12 Hofman M., Maksić I., Bačkalov I., "Some Disturbing Aspects of Inland Vessel Stability Rules", Journal of Ship Technology, New Delhi, Vol. 2, No. 2, July 2006, pp 1-14.
- 4.13 United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), Inland Transport Committee, Working Party on Inland Water Transport, "Recommendations on Harmonized Europe-Wide Technical Requirements for Inland Navigation Vessels (Resolution No. 61)", March 2006.

- 4.14 Directive of the European Parliament and of the Council, laying down technical requirements for inland waterway vessels (2006/87/EC), Official Journal of European Union, 12 December 2006.
- 4.15 "European Agreement Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Inland Waterways (ADN)", Part 9, Geneva, 26 May 2000.
- 4.16 Bačkalov I., Kalajdžić, M., Hofman M., "On Safety of Inland Container Vessels Designed for Different Waterways", FME Transactions, Belgrade (Serbia), Vol. 36, No. 2, October 2008, pp 51-57.
- 4.17 Hofman M., "Inland Container Vessel: Optimal Characteristics for a Specified Waterway", Proceedings on International Conference on Coastal Ships and Inland Waterways II, London, 2006.
- 4.18 Truijens P., Vantorre M., Van der Werff T., "On the Design of Ships for Estuary Service", Transactions of the Royal Institution of Naval Architects Vol. 148 (Part A2), Royal Institution of Naval Architects, London, 2006, pp 25-39.
- 4.19 "Moniteur Belge / Belgisch Staatsblad", No. 81, Brussels, 16 March 2007.
- 4.20 Belenky, V., Breuer, A., "Intact and Damage Stability of Ships and Offshore Structures – Bridging the Gap", Proceedings of the 10th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures (PRADS), Houston, 2007.
- 4.21 Vantorre M. et al., "Risk Analysis for Inland Vessels for Estuary Service", 31st PIANC Congress, Estoril, 2006.
- 4.22 Faltinsen, O., "Sea Loads on Ships and Offshore Structures", Cambridge University Press, 1995.
- 4.23 Journée, J.M.J., Massie, W.W., "Offshore Hydromechanics", Delft University of Technology, 2000.
- 4.24 Ditlevsen O., "Stochastic model for joint wave and wind loads on offshore structures", Structural Safety, Vol. 24, 2002, pp 139-163.
- 4.25 Hofman, M., Bačkalov, I., "Cougar Ace: The Tipping Point", The Naval Architect, RINA, London, April 2007, pp 10-11.

5. Пробабилистичка анализа бродолома

Анализа несрећа је важан сегмент инжењерске праксе. Разумевање узрока несрећа неопходно је за побољшање сигурности брода, посаде, путника и товара. Потреба да се несрећа предупреди подстиче иновативан приступ пројектовању и иницира стварање нових прописа.

Идентификација узрока несреће предуслов је процене ризика. На нивоу IMO, Formal Safety Assessment (FSA) приступ анализи сигурности прихваћен је као основа за развој будућих прописа. FSA студије сигурности које, у поступку процене ризика, користе статистичке податке о поморским несрећама, захтевају „добру“ и поуздану статистику, што подразумева не само обимну базу података, већ и јасно дефинисане узроке несрећа. Међутим, ако оставимо по страни питање конзистентности оваквог приступа анализи ризика (о чему је било речи у Поглављу 3), расположиве базе података (видети нпр. [5.1]) погодније су за статистичку анализу последица (број људских жртва, повреда, испуштања нафте, хемикалија) него за разумевање узрока несреће [5.2]. Утврђивање стварног разлога несреће често је предмет вишегодишње истраге са неизвесним исходом. Статистички подаци, дакле, могу бити непотпуни и непоуздани што доприноси погрешној слици о сигурности разматраног типа бродова.

Када су у питању несреће везане за губитак стабилитета у олуји (heavy weather), један од разлога непоузданости података који се односе на узрок несреће лежи у ограничењима класичне анализе стабилитета. Класичан приступ проблему ослања се на употребу дијаграма стабилитета и не успева да на одговарајући начин опише околности у којима се брод нашао у тренутку несреће. Типичан пример је несрећа брода Кугар Ејс (*Cougar Ace*).

У поступку процене сигурности, право место пробабилистичких алата налази се у откривању „слабости“, недостатака одређеног брода у погледу сигурности. Активан приступ пробабилистичке анализе огледа се у моделовању сценарија могућих несрећа пре него што се оне догоде (па би FSA студије требало да се ослањају на пробабилистичке моделе, пре него на статистику). Међутим, пробабилистичка метода налази примену и у истраживању узрока несрећа. Предности пробабилистичке анализе над класичним приступом проблему стабилитета могу се показати управо на бродолому који је доживео Кугар Ејс.

5.1 Анализа поморске несреће Ро-Ро брода Кугар Ејс

Необичан несрећа Ро-Ро брода Кугар Ејс представља један од најзначајнијих бродолома који су се одиграли током 2006. Бродолом је испитиван помоћу пробабилистичких алата недуго након што се одиграо, а резултати испитивања објављени су у раду [5.3]. Кугар Ејс је брод за превоз аутомобила, капацитета 5542 возила, који је редовно саобраћао на линији Јокохама-Ванкувер, на којој је и доживео несрећу 23. јула 2006. Током операције промене баласта на отвореном мору (у складу са захтевима луке у Ванкуверу), на Северном Пацифику, 230 миља јужно од Алеутских острва, брод се накрено за 60° на десни бок и наставио да плута стабилно у овако необичном положају (слика 5.1). Иако је море било узбуркано – према неким извештајима висина таласа била је око 3m а ветар је дувао брзином од око 30kn – временски услови били су далеко од екстремних.



слика 5.1: Брод за превоз аутомобила Кугар Ејс (Cougar Ace) након бродолома

Постојало је више могућих узрока несреће:

- удари ветра и таласа при „доброј“ метацентарској висини;
- удари ветра и таласа при сувише малој метацентарској висини;
- губитак стабилитета при промени баласта, услед негативне метацентарске висине;
- удар тзв. „џиновског“ таласа (freak wave) или параметарско ваљање.

Бродолом је најпре анализиран класичним методом, употребом дијаграма крака стабилитета, а затим и пробабилистичким поступком, нелинеарном диференцијалном једначином ваљања (**једначина 2.6**) и статистичком анализом добијеног кретања.

За потребе анализе, одређене су криве крака стабилитета за низ метацентарских висина (слике 4.27 и 4.28). Негативна метацентарска висина је уобичајени разлог због којег брод може пловити под нагибом, иако су обично у питању мањи углови (положај А на слици 5.2 представља типичан случај). Међутим, крива крака додатног стабилитета показује да Кугар Ејс може да плива стабилно на углу нешто већем од 60° и са метацентарском висином $MG = 0$. Све криве имају карактеристичан минимум на $\varphi \approx 50^\circ$, након чега крак стабилитета, захваљујући великом водонепропусном надграђу, брзо расте са порастом угла накретања. Због тога, постоји и читав опсег **позитивних** метацентарских висина са којима брод може да плива стабилно са великим углом нагиба. У питању су метацентарске висине:

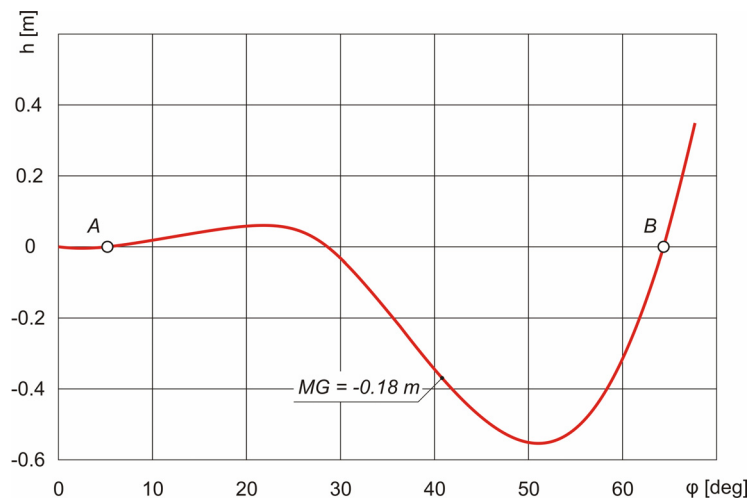
$$0.54\text{m} > MG > 0,$$

којима одговарају стабилни положаји статичке равнотеже:

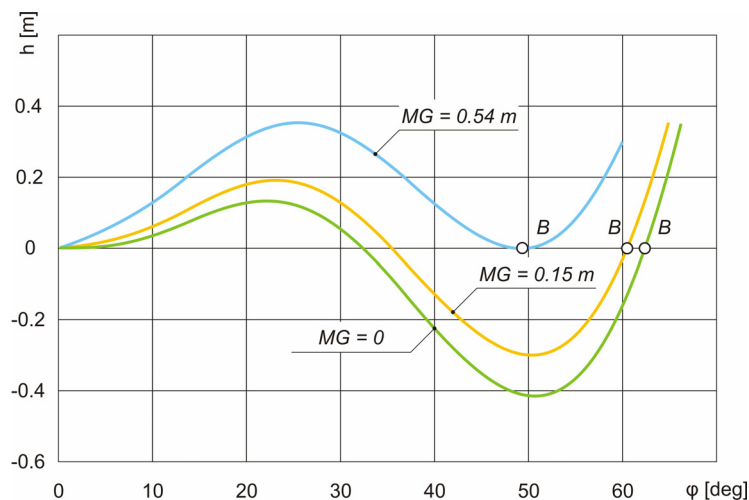
$$\varphi_s = 49^\circ \div 62^\circ .$$

Да је метацентарска висина брода била већа од 0.54m, Кугер Ејс не би могао стабилно да плута у положају у којем се нашао након бродолома. С друге стране, према Критеријуму временских услова, минимална метацентарска висина брода је:

$$MG_{min} = 0.55m.$$



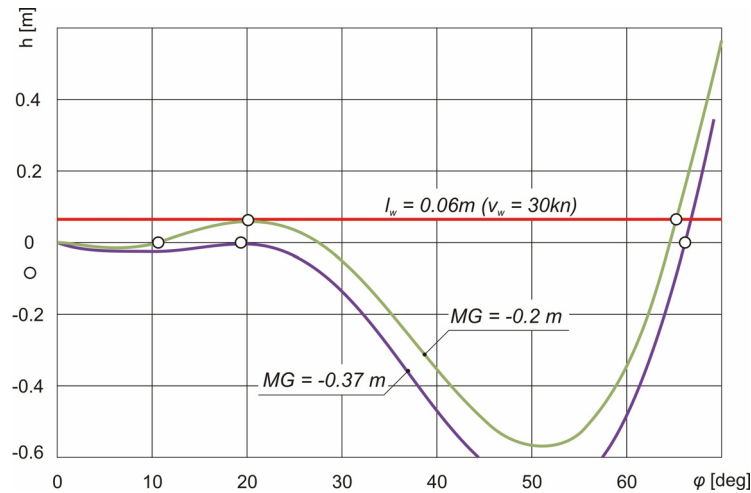
слика 5.2: Стабилни положаји равнотеже брода Кугар Ејс – негативна метацентарска висина



слика 5.3: Стабилни положаји равнотеже брода Кугар Ејс – позитивне метацентарске висине

Класична анализа указује да је Кугер Ејс у тренутку несреће могао имати позитивну метацентарску висину, као и да је та метацентарска висина била мања од минимума прописаног Критеријумом временских услова. С друге стране, до губитка стабилитета могло би доћи под дејством константног момента ветра брзине 30kn и ако је метацентарска висина негативна (слика 5.4). Осим тога, брод

је могао заузети описани положај и само услед негативне метацентарске висине настале због грешке током измене баласта, без утицаја ветра и таласа, али (као што се види на слици 5.4) морала је бити у питању „врло негативна“ вредност, $MG < -0.37m$.



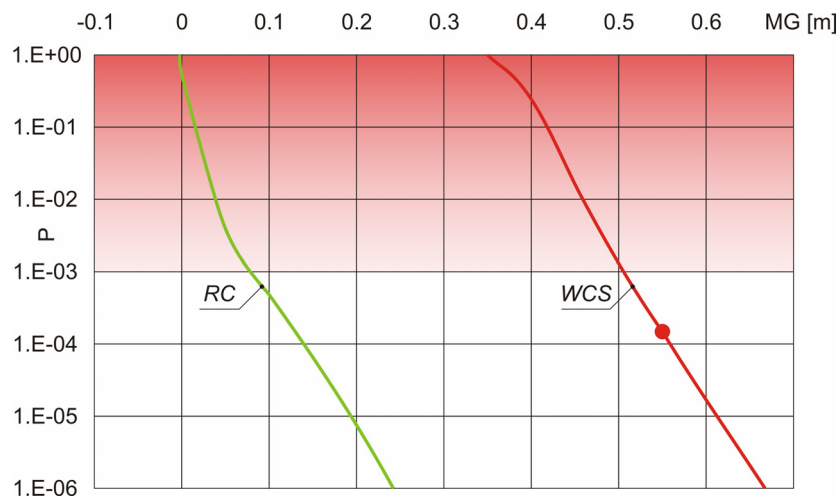
слика 5.4: Стабилни положаји равнотеже брода Кугар Ејс – негативне метацентарске висине

Овде, међутим, престају могућности решавања проблема применом класичне анализе стабилитета. Брод не „мирује“ у усправном положају, већ се ваља на таласима. Ветар није константан, већ стохастички променљив. Положај брода на таласима и амплитуде удара ветра нису познати, а користећи класичну анализу стабилитета могу се само (грубо) претпоставити. Класични поступак не нуди одређено решење већ широк опсег позитивних и негативних метацентарских висина при којима је могло доћи до несреће. Дијаграми стабилитета показују да је метацентарска висина, у сваком случају, била мања од прописане. Због тога, изгледа да је људска грешка, током операције промене баласта, проузроковала несрећу.

Па ипак, нека питања остају без одговора. Да ли је несрећа могла бити избегнута упкрос људској грешци? Да ли је несрећа искључиво последица грешке посаде без обзира на временске услове? Да би се дошло до прецизнијег одговора, неопходна је динамичка анализа проблема, а то није могуће без познавања амплитуда ваљања брода на таласима и амплитуда удара ветра. Промена ових величина током времена остаје скривена за класичан поступак, због чега овакав приступ проблему стабилитета даје ограничен увид у „сценарио“ бродолома и, у општем случају, није у стању да укаже на стварне узроке несреће. С друге стране, пробабилистички приступ заснива се на симулацији кретања брода у реалним условима, што омогућава израчунавање амплитуда ваљања у било којим, задатим околностима.

Да би се испитала вероватноћа губитка стабилитета у условима у којима се одиграо бродолом, пробабилистичка анализа кретања урађена је најпре за

временске услове који се помињу у извештајима о несрећи. Затим, како би се утврдило да ли се брод који задовољава Критеријум временских услова може сматрати сигурним према предложеним пробабилистичким прописима, анализа је урађена и за олују Критеријума временских услова. Резултати анализе приказани су на слици 4.30 помоћу две пробабилистичке криве одређене у функцији метацентарске висине. Крива *RC* (*Reported Conditions*) прати промену вероватноће да ће испитивани брод достићи положај стабилне равнотеже при великом углу накретања (исход бродолома), при чему газ брода одговара стању крцања у време несреће, а брод је током два часа изложен бочном ветру брзине 30kn и бочним таласима значајне висине 3m (временски услови из извештаја о несрећи). Крива *WCS* (*Weather Criterion Storm*) описује промену вероватноће достизања 50° (пошто су углови превртања значајно већи) у олуји Критеријума временских услова, при чему брод има пројектовани газ.



слика 5.5: Резултати пробабилистичке анализе бродолома брода Кугар Ејс

Крива *RC* показује да је брод могао доживети несрећу, под ударима ветра и таласа, са позитивном метацентарском висином, под условом да је она била веома мала:

$$P > 10^{-3}, MG < 0.07\text{m}.$$

Па ипак, тако малу вредност *MG* било је могуће постићи истовременим пражњењем више баластних танкова. У зависности од метацентарске висине брода пре истовара баласта, постоје различите комбинације танкова чијим пражњењем метацентарска висина опада до критичне вредности не веће од неколико центиметара (Табела 4.15). Такође, крива *RC* показује да одређено опадање метацентарске висине (чак за 0.4m) испод вредности прописане Критеријумом временских услова, у датим временским условима не би довело до несреће. Вероватноћа критичног догађаја смањује се брзо са повећањем метацентарске висине; несрећа би била избегнута да је брод имао макар

минималну метацентарску висину према општим одредбама ИМО прописа, $MG = 0.15\text{m}$.

С друге стране, крива WCS показује да би се Кугар Ејс, под условом да задовољава минималне захтеве у погледу стабилитета према ИМО Резолуцији [5.4], могао сматрати сигурним и према предложеном пробабилистичком критеријуму сигурности у олуји:

$$P(MG_{min} = 0.55\text{m}) = \mathbf{O}(10^{-4}) < P_{req} .$$

Применом пробабилистичке анализе потврђени су неки налази класичног приступа (да је метацентарска висина могла бити позитивна, али свакако мања од минимума одређеног ИМО прописима). Међутим, док класични алати не успевају да прецизније дефинишу узроке несреће, реконструкција највероватнијег сценарија бродолома постаје могућа употребом прорачуна понашања брода на таласима и рачуна вероватноће. Према том највероватнијем сценарију, дошло је до грешке током операције промене баласта на отвореном мору, тако што је истовремено истоварен већ број танкова него што је предвиђено. Услед тога метацентарска висина брода опала је до неке мале вредности, нпр. 0.05m , што је било довољно да брод, изложен таласима и налетима ветра, изгуби стабилитет и нагне се до угла $\approx 60^\circ$.

Табела 5.1: Опадање MG брода Кугар Ејс при пражњењу баластних танкова						
MG [m]	$WBT3.P$	$WBT3.S$	$WBT4.P$	$WBT4.S$	$WBT5.P$	$WBT5.S$
1.78	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0.06	50%	50%	0%	0%	0%	0%
0.008	10%	10%	10%	10%	10%	10%

1.47	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0.026	0%	0%	100%	100%	0%	0%

1.01	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0.073	50%	50%	50%	50%	100%	100%

Иако је у питању бродолом са озбиљним последицама по брод (који је изгубио стабилитет и способност пловидбе) и товар (аутомобили који су се налазили на броду повучени су из продаје) и, уопште, великом материјалном штетом (укључујући трошкове спасавања брода, изгубљено време и др.), током саме несреће није изгубљен ниједан људски живот. (Страдао је само инжењер

бродоградње који је неколико дана након несреће вршио увиђај на броду.) Према смерницама које користи ИМО [5.5], с обзиром да у бродолому Кугар Ејса није било ни погинулих ни повређених, последице несреће не могу се сматрати озбиљним. Ово се не односи само на бродолом Кугар Ејса, већ и на низ других, значајних несрећа. Примера ради, насукање брода *Riverdance* (слика 5.6), бродолом контејнерског брода *MSC Napoli* (слика 5.7), те удар контејнерског брода *Cosco Busan* у мост (што је проузроковало штету од 70 милиона долара и велико испуштање нафте у заливу Сан Франциска), строго гледано, такође спадају у категорију несрећа са мањим последицама. Наиме, параметар *S* (видети Поглавље 3) који се користи у поступку одређивања тзв. Severity Index-а, који служи као показатељ последица несреће, заснива се на броју људских жртава, односно на повредама насталим у несрећи. Због тога, Severity Index не успева да узме у обзир на одговарајући начин ни материјалну штету насталу услед губитка брода или терета, ни последице загађења животне средине. У исправној FSA студији, материјална штета настала у поменутих несрећама била би урачуната у економској анализи контроле ризика (фаза 4. FSA анализе). Међутим, у већини студија сигурности заснованих на FSA методи, непотпуна процена несреће понавља се више пута: потенцијални губитак људског живота (Potential Loss of Life – PLL) користи се да би се квантификовале последице несреће, а економска (cost-benefit) анализа мера за смањење ризика заснива се, заправо, на смањењу броја настрадалих.

слика 5.6: Брод *Riverdance* након насукањаслика 5.7: Брод *MSC Napoli* након бродолома

У FSA студији [5.6], употребљен је другачији и, чини се, прикладнији приступ када су у питању несреће узроковане губитком стабилитета. Студија је требало да покаже колико је оправдано да Резолуција А.749(18) (Код о стабилитету неоштећених бродова) постане обавезујућа¹⁰. Ризик је изражен новчаним трошковима по броду, на годишњем нивоу, тако што је вероватноћа да ће доћи до губитка стабилитета помножена последицама – просечном ценом једне такве несреће (1.17 милиона евра). Трошкови обухватају оштећења брода, терета и

¹⁰ Одговарајућим амандманима на конвенције SOLAS и ICLL, нови прописи о стабилитету, тзв. 2008 IS Code постали су обавезујући.

последице по животну средину, али не и људске жртве, што представља недостатак оваквог приступа.

Због тога, неки аутори [5.2] сматрају да, све док нумеричка вредност којом се квантификује ризик не буде одражавала последице како по људски живот, тако и по брод и животну средину, размере несреће не морају нужно бити квантификоване. (У међувремену, појавили су се предлози како да се побољша Severity Index како би биле обухваћене и последице по животну средину [5.7].) Иако се обично сматра да је квалитативна процена једноставнија, али да не пружа довољан увид у степен ризика [5.8], према [5.2] квалитативно рангирање несрећа понекад би могло представљати поузданији показатељ, што случај брода Кугар Ејс доказује.

5.2 Литература

- 5.1 Kontovas, Ch., "Formal Safety Assessment: Critical Review and Future Role", Diploma Thesis, School of Naval Architecture and Marine Engineering, National Technical University of Athens, July 2005.
- 5.2 Kontovas, Ch. A., Psaraftis, "Formal Safety Assessment: A Critical Review", Marine Technology, Vol. 46, No. 1, January 2009, pp. 45–59.
- 5.3 Hofman, M., Bačkalov, I., "Cougar Ace: The Tipping Point", The Naval Architect, RINA, London, April 2007, pp. 10-11.
- 5.4 Resolution A.562(14) "Recommendation on a severe wind and rolling criterion (weather criterion) for the intact stability of passenger and cargo ships of 24 metres in length and over", International Maritime Organization, 1985.
- 5.5 "Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for Use in the IMO Rule-Making Process", MSC/Circ. 1023, MEPC/Circ. 392, International Maritime Organization, London, 5 April 2002.
- 5.6 "Review of the Intact Stability Code – Information on a proposal of making the intact stability criteria mandatory", Submitted by Germany, IMO Sub-Committee on Stability and Load Lines and on Fishing Vessels Safety, 46th Session, Agenda Item 6, 3 July 2003.
- 5.7 "Formal Safety Assessment - Report of the Correspondence Group on Environmental Risk Evaluation Criteria", Submitted by Greece, Marine Environment Protection Committee, 57th session, Agenda item 17, 17 December 2007.
- 5.8 "Guidance on the Safety Role of the Naval Architect", The Royal Institution of Naval Architects, London, January 2009.

6. Пројектовање на основу ризика

Поступак пројектовања који узима у обзир ризик, као један од критеријума, (Risk-Based Design) представља обећавајући корак ка економичнијим, ефикаснијим и сигурнијим бродовима. Као што смо видели у Поглављу 3, појам „ризик“ не односи се само на несреће (колапс конструкције, превртање, пожар) већ и на кварове система, љуљање великим амплитудама, опасна убрзања и сл., који могу проузроковати догађаје са фаталним последицама по човека, брод или околину.¹¹ У поступку пројектовања на основу ризика користе се пробабилистичке методе прорачуна. Могућност увођења иновативних решења и оптимизације постојећих, представљају најважније разлоге за другачији концепт пројектовања. Према традиционалном приступу пројектовању, пројектант настоји да задовољи захтеве бродовласника у погледу брзине, аутономије, корисне носивости и сл., док сигурност происходи из поштовања (детерминистичких) правила регулаторних тела. Пројектовањем на основу ризика сигурност постаје непосредна „брига“ пројектанта који – употребом пробабилистичких метода – треба да постигне ниво ризика мањи од дозвољеног. Начин на који се постиже захтевани ниво сигурности није унапред прописан, што омогућава примену нових решења која би иначе била неприхватљива према постојећим правилима, или оптимизацију већ постојећих решења, „невидљиву“ за детерминистичке прописе. То не значи да регулаторна тела постају излишна. Напротив, нови приступ пројектовању захтева и нови поступак одобравања пројекта (Risk-Based Approval). Један од резултата истраживачког пројекта SAFEDOR је предлог процедуре одобравања пројекта брода заснованог на процени ризика [6.2], чији аутори упозоравају на потребу за учесталом комуникацијом заинтересованих страна, „значајно дуготрајнији процес“ и више потребне документације, него у случају пројектовања према детерминистичким правилима.

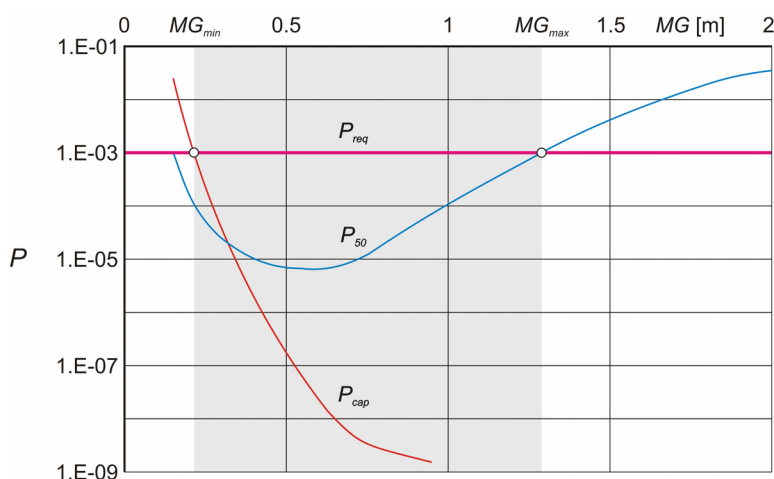
У текућем Поглављу, представљени су они аспекти истраживања који се односе на практичну употребу пробабилистичких резултата у поступку пројектовања морских и речних бродова, односно на она побољшања, са аспекта стабилитета брода у олуји, која се у пројектовању могу постићи применом описане пробабилистичке анализе.

¹¹ Пошто овакав приступ пројектовању узима у обзир квалитет живота и рада, као и очување околине, неки аутори (у грађевинарству) користе термин Performance-Based Design [5.1].

6.1 Оптимална метацентарска висина

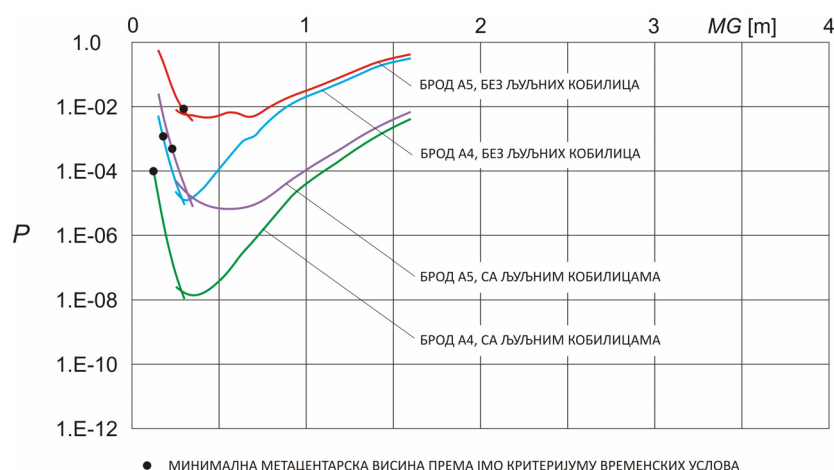
Према терминологији усвојеној у Поглављу 3, превртање брода представља потпуни губитак стабилитета, догађај са фаталним последицама који свакако мора бити спречен. У олујама, међутим, могу настати велики углови ваљања, мањи од угла превртања али једнако ризични за посаду, терет, брод, екосистем или пловни пут. Због тога је динамичко накретање до великих углова означено као један од облика делимичног губитка стабилитета. Вероватноћу делимичног губитка стабилитета такође је неопходно ограничити.

Вратимо се испитивању описаном у Поглављу 4, Део 4.1. Вероватноћа превртања тест-бродова, у функцији метацентарске висине, приказана је на сликама 4.3 и 4.4. Свакој метацентарској висини одговара један угао превртања који се повећава са повећањем метацентарске висине. Након извесне вредности MG , превртању одговарају веома велики углови (већи од 50°), због чега вероватноћа превртања (вероватноћа потпуног губитка стабилитета) престаје да буде релевантан показатељ сигурности брода у бочној олуји. Према пробабилистичком концепту прописа о стабилитету морских бродова, изложеном у Поглављу 3, ваљање брода је ограничено на 50° (угао делимичног губитка стабилитета). Да би употпунили слику о стабилитету испитиваних бродова у олуји, одређена је вероватноћа достизања 50° (P_{50}), у функцији метацентарске висине. Добијени резултат, приказан на слици 6.1, веома је занимљив. Наиме, крива P_{50} има јасно изражен минимум након којег се, са повећањем метацентарске висине, повећава и вероватноћа делимичног губитка стабилитета. Добијени резултат је сасвим „неортодоксан“ и наизглед у супротности са традиционалним приступом проблему стабилитета. Резултати добијени пробабилистичком анализом указују да брод који се обично сматра стабилнијим (брод веће метацентарске висине) може бити несигурнији у олуји, када је изложен бочним таласима и ветру!

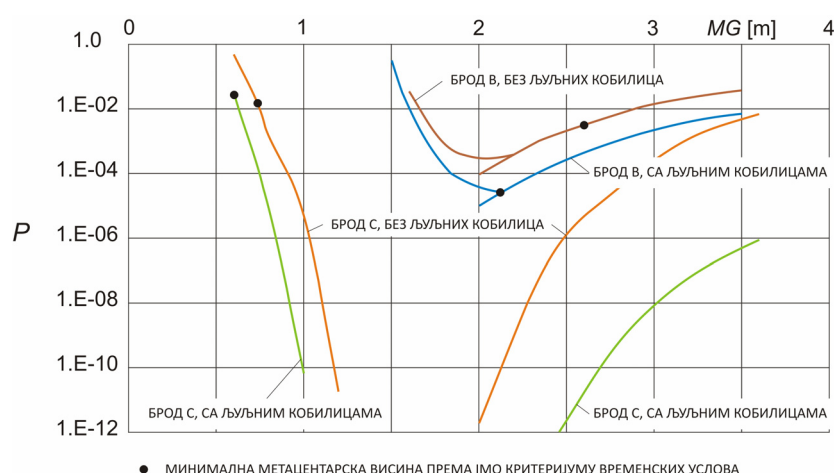


слика 6.1: Криве вероватноће потпуног P_{svp} и делимичног губитка стабилитета P_{50} дефинишу минималну и максималну метацентарску висину

Заједно, криве вероватноћа потпуног (P_{cap}) и делимичног (P_{50}) губитка стабилитета пружају увид у сигурност брода у зависности од метацентарске висине. На сликама 6.2 и 6.3, приказане су криве P_{cap} и P_{50} које одговарају тест-бродовима из истраживања описаног у Полављу 4, Део 4.1 и представљеног у раду [6.3], и које заједно чине по једну „седласту“ криву карактеристичну за сваки брод. Очигледно, сваком броду поред минималне вредности MG , одговара по једна вредност максималне метацентарске висине као горња граница опсега метацентарских висина у оквиру којег је вероватноћа губитка стабилитета мања од дозвољеног нивоа, па се брод може сматрати сигурним. Осим тога, минимумом „седла“ дефинисана је метацентарска висина при којој је вероватноћа губитка стабилитета најмања, односно сигурност у (бочној) олуји је највећа. Ову метацентарску висину, која је са становишта сигурности најповољнија, можемо назвати **оптимална метацентарска висина**.



слика 6.2: Седласте криве тест-брода А



слика 6.3: Седласте криве тест-бродова В и С

Оптимална, као и максимална метацентарска висина представљају новину у анализи проблема стабилитета. Наиме, постојећи прописи о стабилитету ограничавају минималну вредност MG ; непосредно, тако што захтевају да минимална метацентарска висина не буде мања од 0.15m, и посредно, посредством *Критеријума временских услова* и општих критеријума о стабилитету који се односе на карактеристике криве крака стабилитета. Максимална вредност метацентарске висине није ограничена прописима о стабилитету, а у поступку пројектовања може се појавити у склопу настојања да се смањи сопствена фреквенција ваљања односно амплитуда ваљања. Брод тако постаје „мекши“, удобнији за посаду и путнике, а силе које делују на терет мање. Препорукама за RMS вредност угла ваљања (видети нпр. [6.4]), критеријуми поморствености посредно ограничавају максималну метацентарску висину. Међутим, традиционалне представе о стабилитету не препознају опасност коју могу изазвати велике метацентарске висине. Уобичајено је становиште да „већа метацентарска висина значи стабилнији брод“. Пробабилистичка анализа, међутим, показује другачије.

Треба напоменути да су Франческуто и Булиан [6.5] први увидели да се пробабилистичким поступком може одредити максимална вредност MG , тј. да постоји опсег метацентарских висина „прихватљивих“ са становишта сигурности. Међутим, у раду [6.5] није истакнут значај који овај налаз може имати за поступак пројектовања, нити је уочена могућност проналажења оптимума унутар добијеног опсега.

У литератури има мало података о „добрим“ метацентарским висинама које одговарају различитим типовима бродова. Разлог би могао бити то што потпунија анализа стабилитета – у класичном смислу, помоћу дијаграма момента стабилитета – захтева познавање криве крака стабилитета, односно бродске форме, док сама метацентарска висина није довољно поуздан показатељ. Због тога, у претпројекту, када форма није позната (осим ако се пројект не заснива на већ изграђеном броду), препоручене метацентарске висине не би биле од велике помоћи. (Иако је пробабилистичка анализа показала да ни познавање момента стабилитета само по себи није довољно да би се утврдио стабилитет брода у олуји.) Препоруке које би могле послужити као смернице при пројектовању су, дакле, ретке и махом проистичу из искустава бродоградитеља и бродоградилишта (видети нпр. [6.6] и [6.7]) са појединим типовима бродова. Препоруке се могу односити само на минималну метацентарску висину, као што је случај са веома старим препорукама Поздјунина из 1925. и Јохов-Ферстера из 1928. (видети [6.8]) а понекад се своде на сасвим уопштене примедбе¹². Лаптев [6.7] наводи и (такође врло стару) препоруку Андерсона, занимљив покушај да се „норма“ метацентарске висине повеже са дејством спољашњих момената:

¹² Дејвид Ватсон, истакнути пројектант богате каријере, ограничава се на то „да би волео да сваки брод у најнеповољнијем случају има метацентарску висину 0.4m“ [5.9].

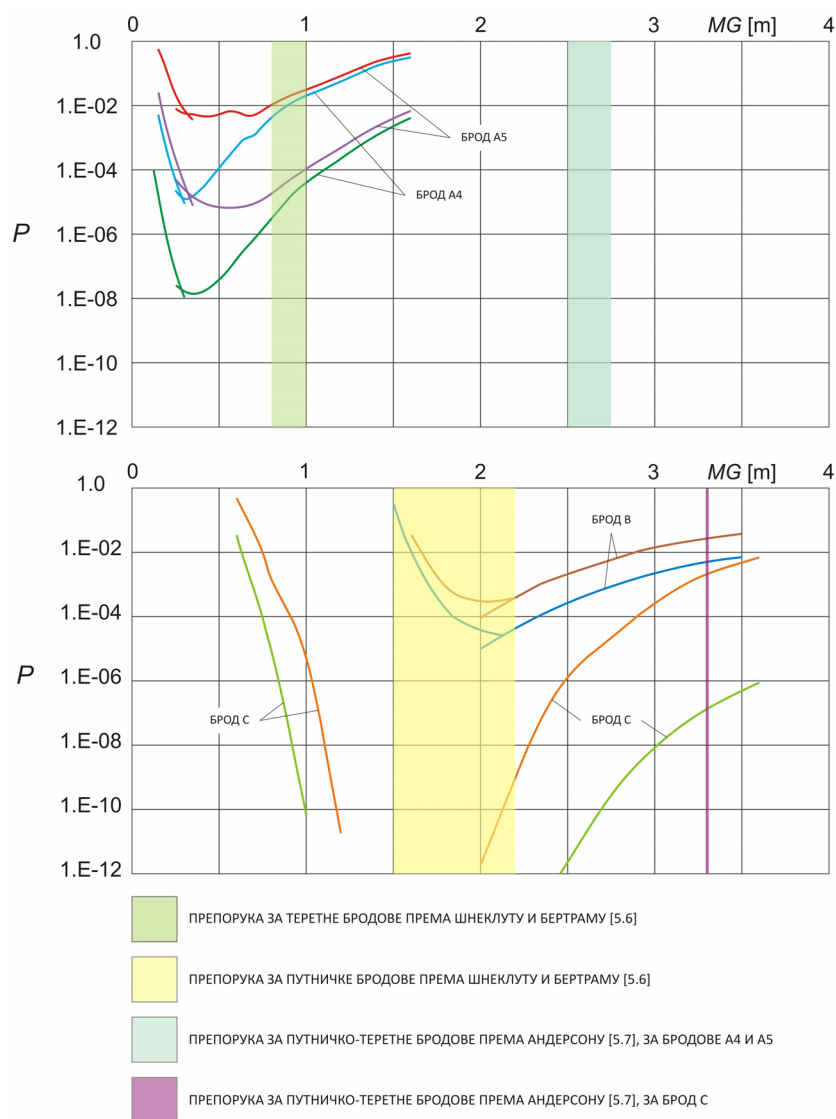
$$MG = \frac{0.7 \cdot R}{C_B \cdot A},$$

где су R и A надводна и подводна латерална површина, респективно. Препорука је намењена „путничко-теретним“ бродовима, а Аутор претпоставља да се односила на све бродове осетљиве на ударе ветра. С обзиром да се препоруке заснивају на већ изграђеним бродовима, који су се у служби показали као „успели“ или „добри“, односно на „доброј бродограђевној пракси“, неке од њих су застареле и нису примењиве на савремене типове бродова, што је делимично приказано дијаграмима на слици 6.4. Андерсонова препорука, нпр. примењена на тест-брод С (Ро-Ро брод) даје вредност метацентарске висине која тежи горњој граници опсега дозвољених MG . Ако се, пак примени на бродове В и С, добијају се високе вредности метацентарских висина знатно изнад максималних вредности MG добијених пробабилистичким поступком. Делимично слагање са пробабилистичким резултатима показује само препорука за метацентарске висине путничких бродова, према [6.6]. По природи ствари, „добра бродограђевна пракса“ заостаје за развојем нових типова бродова због чега појам „добре“ метацентарске висине, у традиционалном приступу пројектовању, може имати само ограничено значење, примењиво на неке од већ постојећих серија бродова.

Пробабилистички приступ даје ново, потпуније значење метацентарској висини као основном параметру стабилитета. Наравно, познавање бродске форме (односно криве крака додатног стабилитета) неопходно је и у поступку пробабилистичке анализе, која почива на нелинеарном моделу ваљања. Међутим, ако је форма позната, оптимална метацентарска висина – са аспекта стабилитета брода у олуји – представља резултат једне од фаза пројектовања, док је „добра“ метацентарска висина (у оном облику у којем је познаје традиционална бродоградња) резултат вишегодишњег, па и вишедеценијског праћења бродова одређене серије у служби. Ако оставимо по страни сумње у поузданост таквог искуства, време потребно за сагледавање предности и мана неке нове форме очигледно кочи иновативност у бродоградњи. Пробабилистичка анализа, међутим, омогућава искорак из традиционалног приступа пројектовању заснованог на искуству и нуди „пречицу“ ка ефикаснијим решењима у чију сигурност се можемо поуздати.

Осим у пројектовању, „седласта“ крива опсега дозвољених метацентарских висина могла би се применити и у служби. Као што се може видети на слици 6.2, опсег метацентарских висина прихватљивих са становишта стабилитета брода у бочној олуји, није исти за све бродове и креће се од 0.5m до више метара. Очигледно, опсег „сигурних“ метацентарских висина зависи од спољашњих сила. Резултати приказани на слици 6.2 односе се на олују Критеријума временских услова, која представља „универзалне“ екстремне спољашње услове, усвојене у поступку дефинисања концепта нових прописа (Поглавље 3). Пробабилистички прописи за бродове намењене приобалној пловидби, међутим, полазе од статистичких података о стању мора, правцу напредовања таласа, итд. на

одређеном правцу и ограничавају временске услове у којима се брод може сматрати сигурним. То значи да се за свако стање мора и карактеристичну брзину ветра може одредити по једна седласта крива, слична оној на слици 4.25, односно да се опсег дозвољених метацентарских висина мења у складу са метеоролошким условима (временском прогнозом). У том смислу, пробабилистички поступак анализе стабилитета пружа могућност „подешавања“ метацентарске висине брода у служби, у циљу постизања потребног нивоа сигурности.



слика 6.4: Поређење постојећих препорука за метацентарске висине са оптималним метацентарским висинама добијеним пробабилистичком анализом

6.2 Неке смернице за пројектовање речних контејнерских бродова

Без обзира да ли је у питању морска или речна бродоградња, процес техничке иновације покреће потреба за већом сигурношћу, безбедношћу, економичношћу и „чистијим“ транспортом. Па ипак, с обзиром да се транспорт унутрашњим пловним путевима сматра релативно сигурним и прихватљивим са становишта заштите животне средине (о чему би се могло дискутовати), а да је захтев за конкурентношћу са земљаним облицима саобраћаја изражен, чини се да потреба за иновацијом нигде није толико условљена економичношћу транспорта колико у речној бродоградњи.

Превоз контејнера представља једну од мера за повећање конкурентности транспорта унутрашњим пловним путевима. Контејнерски транспорт омогућава превоз робе веће специфичне вредности, укључење речног саобраћаја у доставни ланац и представља одговор на савремене потребе тржишта: превоз „од врата до врата“ (door-to-door transport) и „тачно на време“ (just-in-time), видети нпр. [6.10]. У том смислу, транспорт контејнера реком пуну примену налази у високоразвијеним областима са добром саобраћајном инфраструктуром и интермодалном повезаношћу. Због тога не изненађује развијеност речног контејнерског транспорта у сливу Рајне и релативна неразвијеност истог у дунавском басену. Према скорашњим статистичким подацима [6.11], транспорт контејнера Рајном превазилази два милиона TEU јединица годишње. Подаци за Дунав су оскудни и непотпуни, али указују на то да је број превезених контејнера у читавом дунавском басену (изузев Немачке) вишеструко мањи, чак и када се узму у обзир сви облици транспорта заједно.¹³ Неједначност у развоју два велика дела пан-европског унутрашњег пловног пута одражава се и на бродоградњу.

Пројектанти су суочени са двоструким ограничењима. С једне стране, брод мора бити прилагођен ограничењима и специфичностима пловног пута, која утичу како на основне димензије брода (газ, висину надводног дела, ширину), тако и на одређена техничка решења на броду (избор пропулзора, уређаји за навигацију и др.). С друге стране, речна бродоградња оптерећена је и добром бродографевном праксом, што може имати вишеструке негативне последице. Наиме, с обзиром на дугу традицију речног транспорта у северозападној Европи, пре свега на Рајни, приметна је тенденција да се ово, неоспорно богато искуство и решења која из њега проистичу, у неизмењеном облику примене и на другим унутрашњим пловним путевима, нпр. на Дунаву. Ово се посебно односи на транспорт контејнера. На недостатке таквог приступа указано је у радовима [6.13] и [6.14]. „Копирање“ рајнских искустава успорава процес иновације, умањује ефикасност унутрашње пловидбе и може неповољно утицати на сигурност [6.15]. У Поглављу 4, видели смо да оваква тежња није само део традиционалног, искуственог приступа бродоградњи (под којим бисмо подразумевали градњу „дунавског“ брода по узору на брод који се „добро показао“ на Рајни) већ и да је у одређеној мери, кроз

¹³ Поређења ради, аустријским делом Дунава највише контејнера превезено је током 2001. – нешто више од 10000 [5.12]

постојеће прописе о градњи бродова унутрашње пловидбе, формализована и постала обавезујућа. Применом пробабилистичке анализе, пројектанти се могу ослободити императива добре бродограђевне праксе и фокусирају на развој иновативних решења намењених конкретном пловном путу.

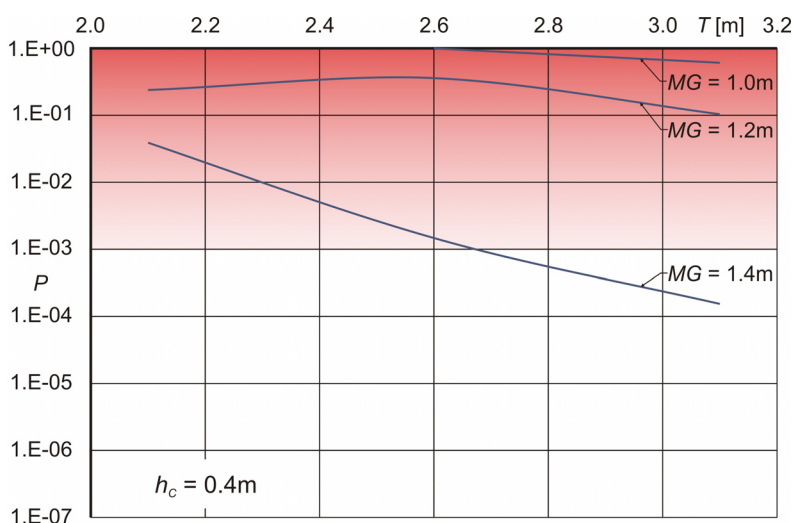
У Поглављу 4, приликом анализе постојећих прописа о стабилитету речних бродова, већ је указано на неке смернице које би могле послужити у поступку пројектовања контејнерских бродова. Прописи Економске комисије за Европу [6.16] систематски су испитивани, најпре на броду газа 2.6m (који бисмо могли сматрати бродом намењеним пловидби на средњем току Дунава), а затим и на бродовима већег и мањег газа, намењеним пловидби на Рајни и Доњем Дунаву, нпр. Пробабилистичким поступком показано је да – у пракси неуобичајено – крцање пет редова контејнера по висини у складиште брода ширине 11.4m, не мора да представља претњу по сигурност брода у олуји. Такође, у светлу критике прописа [6.16], указано је на вредности метацентарских висина и висина пражнице потребних да би се контејнерски брод изложен ударима ветра могао сматрати сигурним.

На слици 6.5 приказане су криве вероватноће наплављивања отвореног складишта речних контејнерских бродова са минималном пражницом према прописима [6.16], у функцији пројектованог газа. Очигледно, ова висина пражнице неприхватљива је за дунавске бродове у читавом опсегу технички реалних метацентарских висина, док се бродови газа већег од 3m могу сматрати сигурним тек ако је $MG > 1.3m$. С друге стране, ако сви бродови, без обзира на подручје пловидбе, имају метацентарску висину 1m, што према прописима [6.16] представља минималну метацентарску висину за бродове који носе нефиксиране контејнере, бродови малог газа морали би да имају веома високе пражнице.

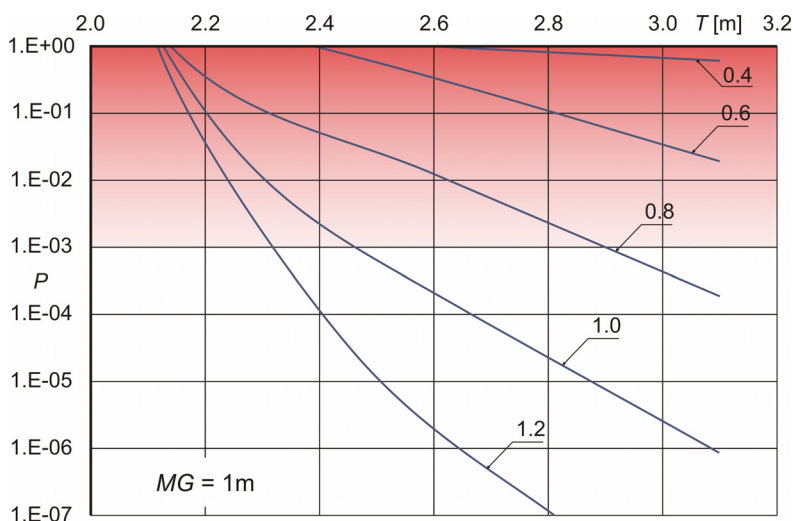
Пошто је Поглавље 4 превасходно било намењено анализи постојећих прописа о стабилитету, у текућем Поглављу настојимо да резултате добијене пробабилистичком анализом систематизујемо и прикажемо на начин погодан за употребу у поступку пројектовања. Пробабилистичке криве у облику приказаном на сликама 4.10 ÷ 4.19, 4.23, 4.24, итд., пружају добар увид у сигурност брода одређене метацентарске висине и пражнице (под условом да је угао делимичног губитка стабилитета дефинисан наплављивањем складишта, а не неким другим углом продора воде). Међутим, овакав начин приказивања захтева посебан прорачун за сваку комбинацију h_c и MG , што може бити непрактично. Нешто другачији приступ могао би бити кориснији у анализи сигурности пројектованог брода.

Сваком пројектованом газу одговара по једна површ којој припадају вероватноће наплављивања брода одређене метацентарске висине и висине пражнице. Површи вероватноће, конструисане за бродове пројектованог газа 2.1m, 2.6m и 3.1m, приказане су на сликама 6.7, 6.9 и 6.11 респективно. Пројекцијом површи вероватноће на раван $h_c - MG$, добијају се „изопробабиле“ (isoprobability contours) – линије које повезују једнаке вероватноће критичног догађаја, у овом

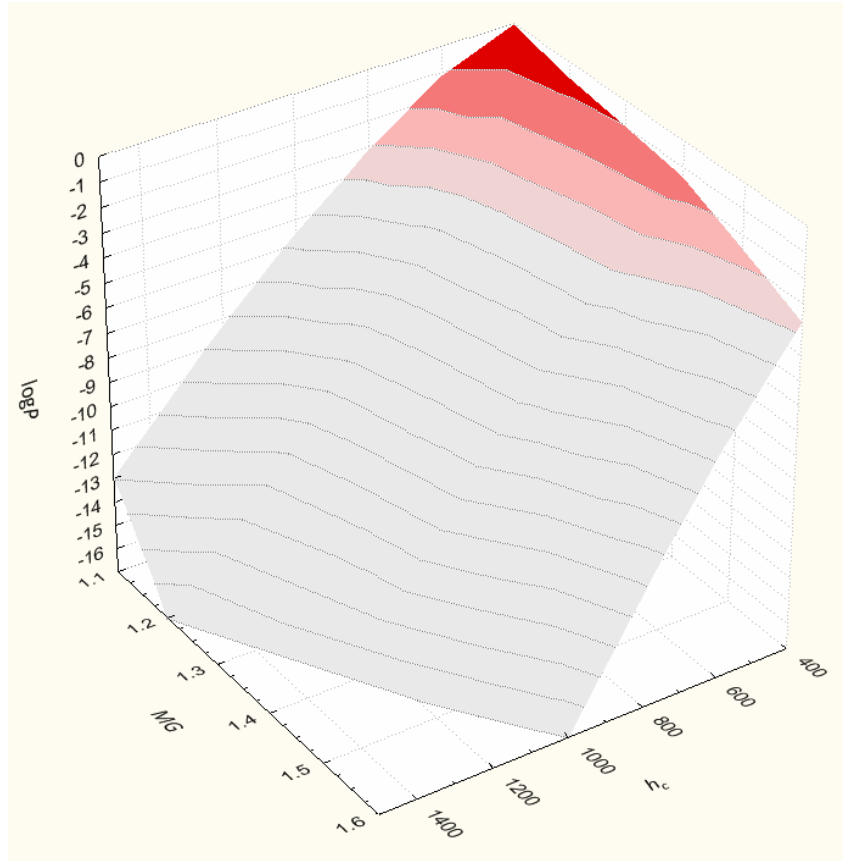
случају наплављивања отвореног складишта. На сликама 6.8, 6.10 и 6.12 приказане су изопробабиле за бродове газа 2.1m, 2.6m и 3.1m. Поново, можемо да закључимо: брод газа 2.1m морао би имати 5 ÷ 15cm веће метацентарске висине у односу на брод газа 3.1m, при истој висини пражнице. План изопробабиле обједињује утицај метацентарске висине и висине пражнице на сигурност брода и – мада његова поузданост зависи од броја расположивих $h_c - MG - P$ координата – омогућава ефикаснију анализу сигурности контејнерског брода. Употребом оваквог плана, пројектант може одредити ниво сигурности који се остварује предвиђеном комбинацијом параметара који утичу на стабилитет, и да одреди ону комбинацију која испуњава минималне захтеве у погледу сигурности брода у олуји.



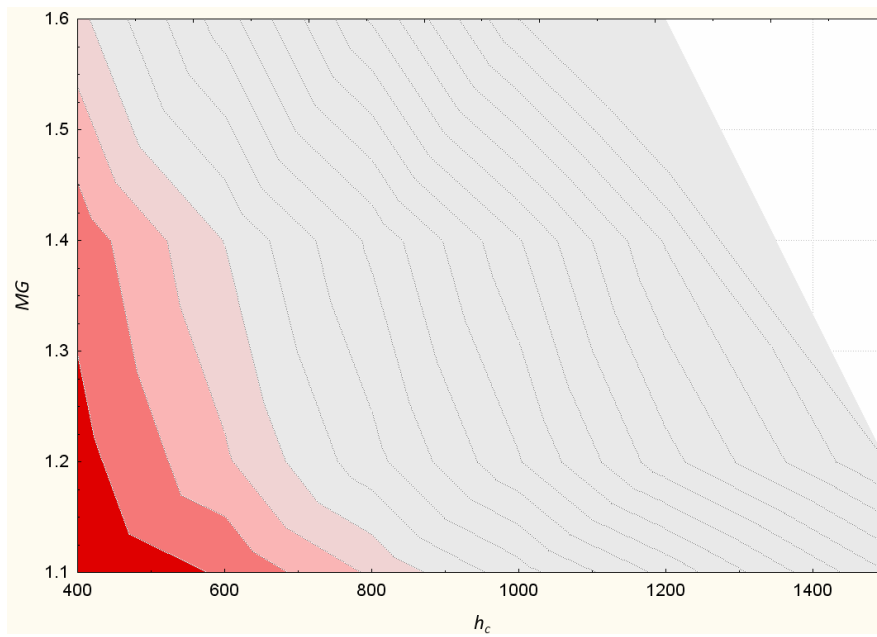
слика 6.5: Криве вероватноће наплављивања за $h_c = 0.4m$ и различите метацентарске висине, у функцији газа



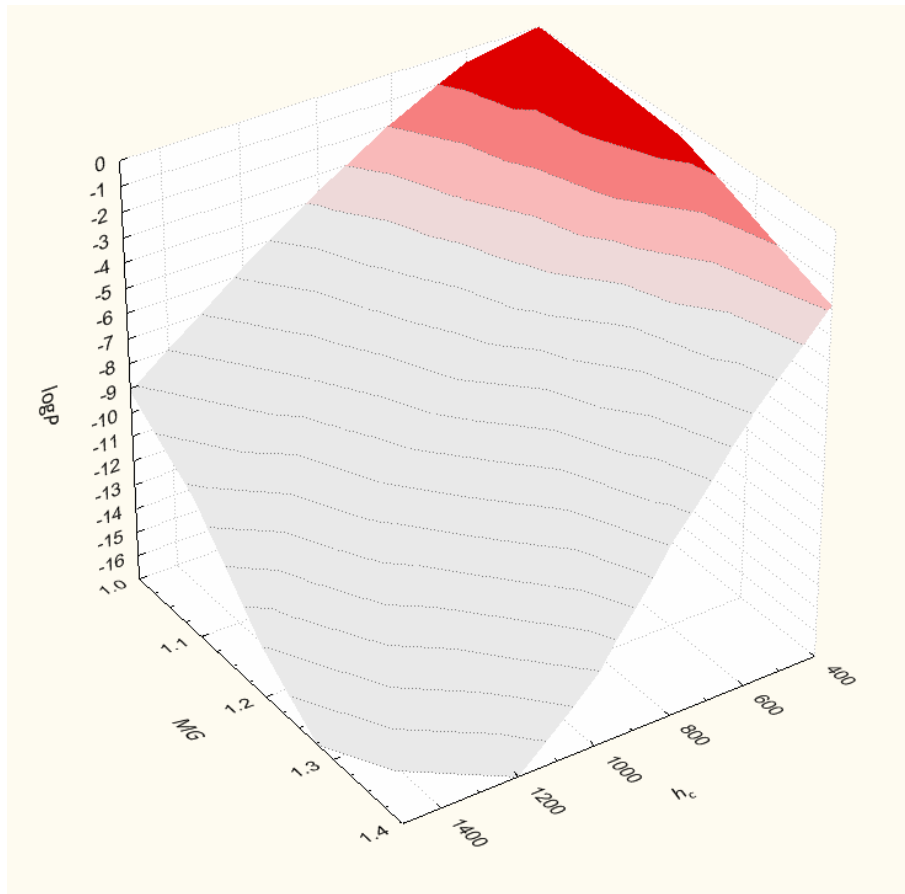
слика 6.6: Криве вероватноће наплављивања за $MG = 1m$ и различите висине пражница, у функцији газа



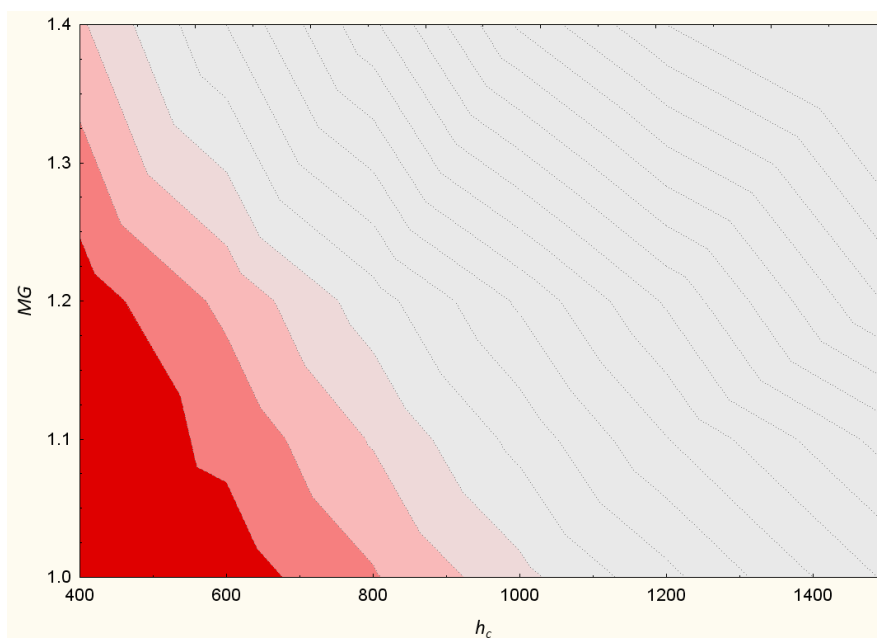
слика 6.7: Површ вероватноће наплавлџивања за брод газа 2.1m



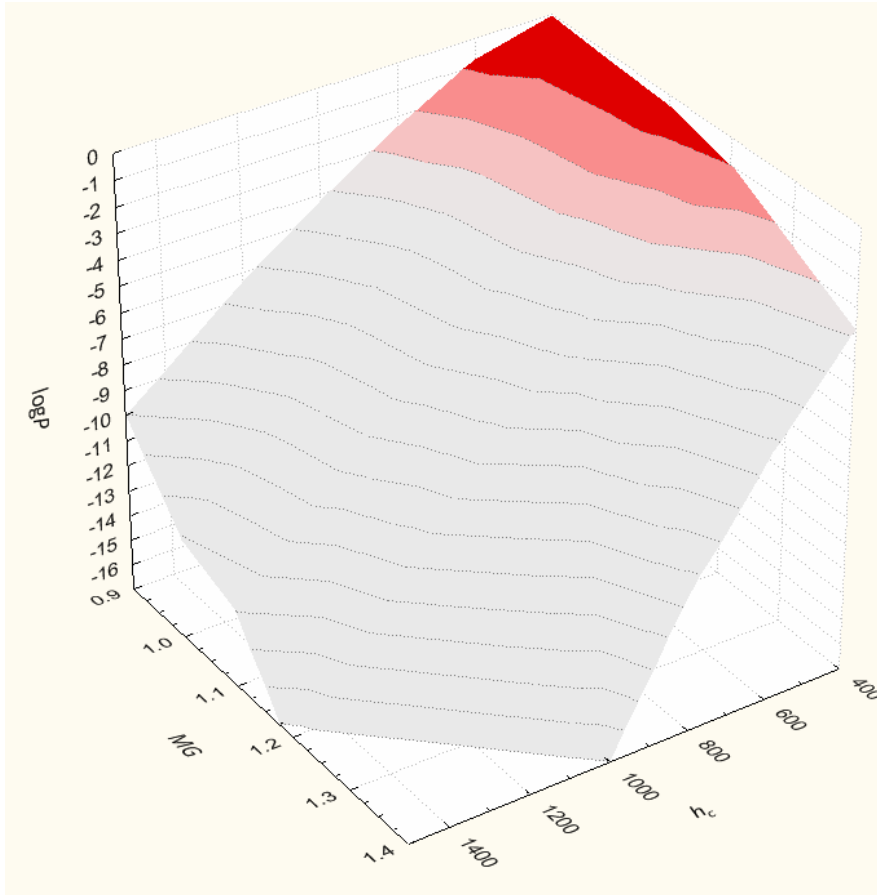
слика 6.8: План изопробабила за брод газа 2.1m



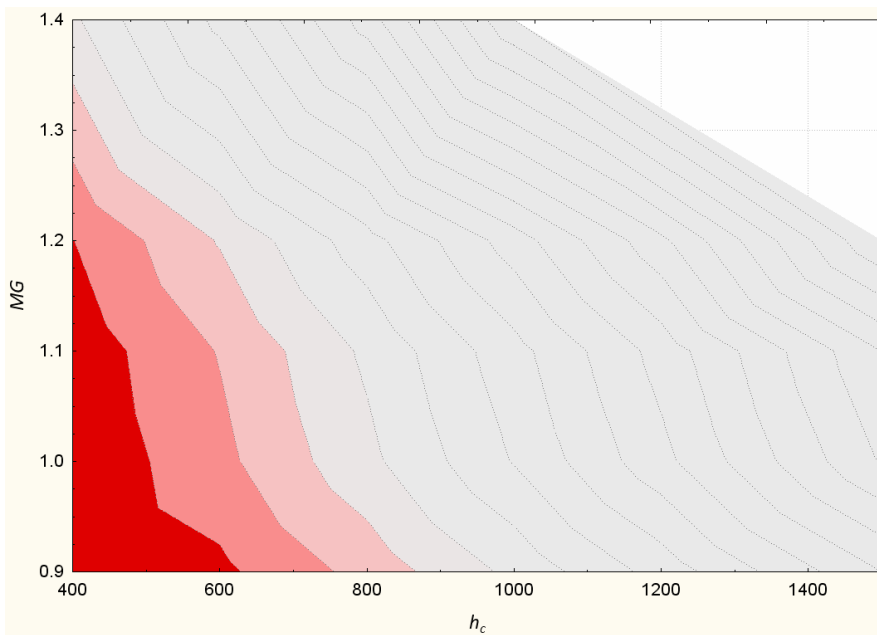
слика 6.9: Површ вероватноће наплавлџивања за брод газа 2.6m



слика 6.10: План изопробабила за брод газа 2.6m



слика 6.11: Површ вероватноће наплављивања за брод газа 3.1m



слика 6.12: План изопробабила за брод газа 3.1m

6.3 Литература

- 6.1 Augusti, G., Ciampolli, M., "Performance-Based Design in risk assessment and reduction", Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 23, 2008, pp. 496-508.
- 6.2 "Goal-based new ship construction standards – Guidelines on approval of risk-based ship design", Submitted by Denmark, Maritime Safety Committee, 86th Session, Agenda Item 5, 9 February 2009.
- 6.3 Hofman M., Bačkalov I., "Weather Criterion for Seagoing and Inland Vessels – Some New Proposals", Proceedings of International Conference on Marine Research and Transportation, University of Naples "Federico II", 2005, pp. 53-62.
- 6.4 Lewis, E. V. (Editor), "Principles of Naval Architecture", Second Revision, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1988.
- 6.5 Bulian, G., Francescutto, A., "A Simplified Modular Approach for the Prediction of the Roll Motion due to the Combined Action of Wind and Waves", Proceedings Inst. Mech. Eng. Vol. 218, Part M, Journal of Eng. for the Maritime Environment 2004, pp. 189-212.
- 6.6 Schneekluth, H., Bertram, V., "Ship Design for Efficiency and Economy", Second Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1998
- 6.7 Laptev, B. „Osnove projektiranja trgovačkih brodova“, Dio I, Brodarski naučni institut, Zagreb, 1951.
- 6.8 Kobylinski, L. K., Kastner, S. "Stability and Safety of Ships. Volume I: Regulation and Operation" Elsevier, Oxford, 2003
- 6.9 Watson, D.G.M., "Practical Ship Design", Elsevier Ocean Engineering Book Series, Vol. 1, Elsevier, Oxford, 2002.
- 6.10 Jonkeren, O., "An explorative study to inland waterway transport: the Rhine market", The 45th Congress of the European Regional Science Association, Amsterdam, 2005.
- 6.11 "Market observation for inland navigation in Europe. Report on the situation at the end of 2007", Central Commission for Navigation on the Rhine, European Commission – DG for Energy and Transport, April 2008
- 6.12 "COLD – Container Liner Service Danube. An Assessment of the Opportunities and Risks of Container Transport on the Danube River between Austria and the Black Sea", via donau, Vienna, 2006
- 6.13 Hofman, M., "Inland Container Vessel: Optimal Characteristics for a Specified Waterway", Proceedings of International Conference on Coastal Ships and Inland Waterways II, RINA, London, 2006, Paper 6.
- 6.14 Radojčić, D., "Danube Intermodal Ships: Container vs. Ro-Ro", 26. Duisburger Kolloquium Schiffstechnik/Meerestechnik, Universität Duisburg-Essen, 2005.

- 6.15 Bačkalov I., Kalajdžić, M., Hofman M., “On Safety of Inland Container Vessels Designed for Different Waterways”, FME Transactions, Belgrade (Serbia), Vol. 36, No. 2, October 2008, pp 51-57.
- 6.16 United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), Inland Transport Committee, Working Party on Inland Water Transport, “Recommendations on Harmonized Europe-Wide Technical Requirements for Inland Navigation Vessels (Resolution No. 61)”, March 2006.

7. Закључне напомене и смернице за будућа истраживања

Основне теме овог рада представљају прорачун нелинеарног ваљања речних и морских бродова у бочној олуји и пробабилистички приступ сигурности који се заснива на овом прорачуну. У раду је показано да пробабилистичка анализа нелинеарног ваљања има вишеструку примену у различитим проблемима везаним за динамички стабилитет брода изложеног дејству ветра или ветра и таласа. На основу добијених резултата, може се извести низ закључака о сигурности брода у олуји али, могу се назначити и смернице за будућа истраживања, посредно или непосредно везана за испитиване проблеме.

Током истраживања, развијено је више оригиналних модела нелинеарног ваљања брода под дејством нерегуларних таласа и стохастички променљивог ветра. Модели су добијени „интуитивним“ поступком, проширивањем линеарне једначине нелинеарним члановима: моментом стабилитета, нелинеарним пригушењем ваљања, моментом ветра, итд. Развијени су модели са једним и два степена слободе: независне диференцијалне једначине нелинеарног ваљања и спрегнуте диференцијалне једначине нелинеарног ваљања и заношења. Модели описују кретање морског брода изложеног дејству таласа и ветра с бока, односно речног брода изложеног бочном ветру. Посебно су занимљиви нелинеарни модели са два степена слободе који описују ваљање и заношење речног контејнерског брода под дејством олујног бочног ветра, као и поређење модела кретања речног брода са једним и два степена слободе. Поређење модела у временском и фреквенцијском домену (слике 2.5 и 2.6, респективно) показује да модели са два степена слободе дају мање углове ваљања, односно да се ваљање брода смањује, када заношење није занемарено. Пловни пут је ограничене ширине, а капетан настоји да задржи брод на „курсу“, због чега претпоставка да се брод потпуно слободно заноси (слика 2.3) није реална. У складу са тим, првобитни модел спрегнутог ваљања и заношења (систем једначина 2.9), „коригован“ је силом (и одговарајућим моментом) чијим дејством брод осцилује око средње трајекторије (слика 2.4). Резултати анализе показали су да модел „брода на курсу“ (систем једначина 2.10) даје веће углове ваљања него када се брод слободно заноси.

На основу до сада реченог, могу се извести два важна закључка. Пре свега, показало се да је за исправну процену сигурности потребан модел који што верније описује кретање брода у олуји. У том смислу, љуљање брода у бочној у олуји било би потпуније приказано моделом који, осим разматраног ваљања и заношења, обухвата и понирање и закретање. Такав модел, међутим, не може се добити поступком примењеним у овом истраживању, већ формалним извођењем спрегнутих нелинеарних диференцијалних једначина кретања. Ово је вероватно најважнији (и најкомплекснији) задатак будућих истраживања. Експериментална провера таквог механичког модела представља посебан истраживачки задатак.

Такође, показало се да сигурност речних бродова у олуји није нимало безазлено питање, упркос уобичајеном гледишту према којем је стабилитет морских бродова много озбиљнији и сложенији проблем. Ово питање постаје посебно значајно у светлу (пројектованог) пораста контејнерског транспорта на унутрашњим пловним путевима. Већ смо видели да, услед ограничења пловног пута, модел кретања брода унутрашње пловидбе мора бити пажљиво промишљен. Током рада на моделу ваљања речног брода, појавила се још једна потешкоћа, које нема у моделима ваљања морских бродова. Наиме, с обзиром да значајни унутрашњи пловни путеви протичу кроз равнице, индустријске зоне, приградска насеља, градска језгра, или – са становишта инжењерске дисциплине која проучава утицај ветра на конструкције – кроз области различитог коефицијента храпавости (Табела 2.1), утицај ветра на сигурност бродова није свуда исти. Амплитуде удара ветра, а тиме и амплитуде ваљања, веће су на делу речног тока који пролази кроз урбану средину него на делу реке који протиче кроз равницу. Вероватноћа губитка стабилитета повећава се са повећањем коефицијента храпавости терена (слике 4.10 ÷ 4.19). Помало неочекивано, прорачун сигурности речног контејнерског брода у олуји, зависи од пловног пута за који је брод намењен, слично морским бродовима чије поморствене карактеристике одговарају предвиђеној области пловидбе. Утицај пројектованог газа на сигурност речних бродова то потврђује.

Пошто одговарајућа метода за прорачун коефицијената нелинеарног пригушења ваљања форме типичне за речне контејнерске бродове, не постоји (или бар није доступна), у већини прорачуна коришћен је полу-емпиријски поступак Икеде. Иако Икедина метода представља стандардан алат за прорачун пригушења ваљања, експериментално испитивање коефицијената пригушења форми карактеристичних за речне бродове допринело би доследности и поузданости анализе сигурности речних бродова.

Будући прописи о сигурности заснивају се на процени ризика, која обухвата прорачун вероватноће критичног догађаја. Допринос истраживања развоју пробабилистичких прописа о стабилитету састоји се у предлогу могућег сценарија, олује на мору или реци у којој брод губи стабилитет. Такође, у раду је предложена квантификована мера сигурности – дозвољена вероватноћа превртања, накретања до великих углова или наплављивања P_{req} .

Вероватноћа губитка стабилитета добија се краткорочном анализом прорачунатог закона ваљања. Дугорочна процена сигурности морала би укључити више различитих сценарија губитка стабилитета у условима на задатој рути. Веза сигурности добијене краткорочном анализом и сигурности брода у читавом радном веку представља предмет посебног истраживања.

Критичка анализа постојећих прописа о стабилитету морских и речних бродова, помоћу пробабилистичких алата, показала је низ недостатака и недоследности ових правила. Наиме, вероватноће губитка стабилитета бродова који имају једнак (минималан) ниво сигурности према детерминистичким прописима, могу да се разликују за неколико редова величина. Ово се у првом реду односи на најважнији пропис о динамичком стабилитету морских бродова, тзв. ИМО Критеријум временских услова, али и на прописе намењене бродовима унутрашње пловидбе. Показало се да Критеријум временских услова није конзистентан са пробабилистичке тачке гледишта: неке бродове чини „сувише“ сигурним, док друге доводи у опасност од губитка стабилитета (слике 4.3 и 4.4). Детерминистички прописи пате од својеврсне „замене теза“, јер прописују начине како да се спречи несрећа и неутралише опасност позната из искуства (иако искуство често није везано за разматрану серију бродова). Истовремено, детерминистички прописи испуштају из вида неке нове карактеристике брода које нису обухваћене прописима, а које би га могле довести у сасвим другачију врсту опасности са катастрофалним последицама (параметарско ваљање Post-Panamax контејнерских бродова представља класичан пример).

Прописи Економске Комисије Уједињених Нација за Европу, тзв. UNECE прописи, настали су у циљу обједињавања разноликих националних прописа у јединствена правила која би важила на европским унутрашњим пловним путевима. Анализа представљена у раду, показала је да ови прописи нису довољно строги, тј. да се бродови, који задовољавају минимум захтева у погледу стабилитета према UNECE прописима, могу наплавити и преврнути у екстремним, али реалним временским околностима. Ово се посебно односи на бродове који носе фиксирани контејнере, али и на већину случајева када брод плови кроз подручје већег коефицијента храпавости (слике 4.10 ÷ 4.19).

Ослањајући се на рајнску бродограђевну традицију, UNECE прописи не успевају да обезбеде сигурност бродова намењених другим пловним путевима, мање дубине него што је случај на Рајни. Речни контејнерски бродови мањег газа, пројектовани у складу са UNECE прописима, имају већу вероватноћу губитка стабилитета (слике 4.23 и 4.24). Примера ради, контејнерски бродови намењени пловидби на Доњем Дунаву, били би мање сигурни у бочној олуји од рајнских контејнерских бродова. Повећање минималне висине пражнице и минималне метацентарске висине (поготово када брод носи фиксирани контејнере), представљају очигледан начин за побољшање UNECE прописа. Пошто се потребно повећање разликује за „дунавски“ и „рајнски“ брод, минимални параметри стабилитета требало би да буду прописани у функцији пројектованог газа.

Примена пробабилистичког приступа у анализи бродолома Ро-Ро брода Кугар Ејс, показала је ефикасност оваквог поступка у испитивању узрока несрећа, посебно у поређењу са класичним алатима за анализу стабилитета. Пробабилистичка анализа сигурности бродова који су доживели несрећу олуји, упркос томе што задовољавају детерминистички Критеријум временских услова може да укаже на оне недостатке пројекта које брод могу довести у опасност, а „промичу“ детерминистичким прописима о стабилитету. Анализа несрећа повезаних са губитком стабилитета може да послужи и за валидацију предложене методе за процену сигурности брода и за евалуацију предложеног критеријума сигурности, дозвољене вероватноће P_{req} .

Иако то није био првенствени циљ истраживања, у раду је указано на неке недостатке савремених студија процене сигурности, и одређене недоследности у смерницама које се користе у процесу формирања нових прописа заснованих на ризику. FSA студије које се у поступку процене ризика служе расположивим статистичким подацима о несрећама, налазе се у опасности да инкорпорирају недостатак постојећих, детерминистичких прописа у будуће, пробабилистичке прописе. Детерминистички прописи, наиме, ослањају се на искуство, тзв. „добру бродоградњу праксу“, због чега намећу непотребна решења савременим бродовима или их доводе у опасност неспособношћу да предвиде опасности које нису обухваћене искуством. Пробабилистички прописи требало би да омогуће повећану ефикасност и сигурност нових бродова са иновативним техничким решењима, који се иначе не би „уклопили“ у оквире постојећих прописа о сигурности.

Формулација Severity Index-а, коју користи ИМО у циљу квантификације последица несрећа, не обухвата последице оних несрећа које не укључују губитак људског живота или повреде посаде и путника. Многе несреће, повезане са губитком стабилитета у олуји, пролазе без људских жртава, али могу имати значајне последице по брод, терет, животну средину. Несрећа брода Кугар Ејс типичан је пример.

Дефиниција опсега прихватљивих метацентарских висина и оптималне метацентарске висине морских бродова, са становишта сигурности у олуји, представљају допринос истраживања пројектовању брода на основу ризика. Оптимална метацентарска висина (слике 6.1 ÷ 6.3) сасвим је нов појам, који значајно мења традиционалне представе у бродоградњи и свакако заслужује да буде додатно истражен. Са становишта пројектанта, посебно је значајна могућност да се, применом пробабилистичке анализе, бродови рангирају према сигурности у олуји.

Коначно, када су речни бродови у питању, веза потребне висине празнице, метацентарске висине, броја редова контејнера и пројектованог газа, добијена пробабилистичким поступком, искоришћена је како би се добиле неке смернице за пројектовање речних контејнерских бродова.

Биографија

Игор Бачкалов рођен је 21.09.1978. године на Цетињу. Основну школу и гимназију завршио је у Приштини. Дипломирао је на Машинском факултету Универзитета у Београду, на Смеру за бродоградњу, 2003. године са просечном оценом у току студија 8.62 и оценом 10 на дипломском испиту.

Игор Бачкалов је уписао магистарске студије на Групи за бродоградњу Машинског факултета Универзитета у Београду школске 2003/04. године и прешао на новоосноване докторске студије школске 2005/06. године.

У току школске 2002/03. године Игор Бачкалов био је ангажован на Катедри за бродоградњу као студент-демонстратор на предмету Теорија брода. Од фебруара 2004. године запослен је на Машинском факултету као асистент-приправник за групу предмета из области Бродоградње. Држао је аудиторне вежбе и преглед пројеката из предмета Теорија брода, Понашања брода на таласима, Бродски системи, Пројектовања брода, Пловност и стабилитет брода 1 и 2 и Међународни прописи у бродоградњи. Такође је учествовао у настави предмета Бродоградња, на Морнаричко-техничкој академији Војске Југославије.

У оквиру својих стручних активности, кандидат се бавио пловношћу и стабилитетом брода, понашањем брода на таласима, као и мерењем на пробним вожњама изграђених бродова. У току 2004. године, кандидат је учествовао у пројекту Технолошког развоја Министарства науке и заштите животне средине Републике Србије: РАЗВОЈ НОВЕ ГЕНЕРАЦИЈЕ РО-РО И КОНТЕЈНЕРСКИХ БРОДОВА (МИС.3.06.0259.А.). Од 2005. до 2007. године, Игор Бачкалов је радио на пројекту Технолошког развоја: РАЗВОЈ НОВЕ ГЕНЕРАЦИЈЕ РЕЧНИХ ТЕРЕТНИХ БРОДОВА (ТР-6317А). Тренутно је ангажован на пројекту Технолошког развоја за период 2008-2010: РАЗВОЈ СИГУРНИХ, ЕФИКАСНИХ, ЕКОЛОШКИХ (СЕ-ЕКО) БРОДОВА (ТР-14012). Кандидат је током 2006. и 2007. године учествовао у пројекту Шестог оквирног програма Европске комисије (FP6), IMPRINT-NET (Implementing Pricing Reforms IN Transport-NETworking) као члан међународне експертске групе за саобраћај на унутрашњим пловним путевима.

Игор Бачкалов је члан Друштва бродограђевних инжењера и техничара ДБИТ, као и британског Краљевског удружења инжењера бродоградње RINA (Royal Institution of Naval Architects).

Кандидат говори енглески и италијански језик.

Дипл. инж. Игор Бачкалов је коаутор пет радова, од којих је један саопштен на међународном скупу и штампан у целини, док су четири објављена у међународним часописима, од којих су два часописа са SCI листе.

Као члан истраживачког тима, Игор Бачкалов је награђен међународном наградом из области бродоградње: RINA-Lloyd's Register Educational Trust Ship Safety Award за 2007-у.

Прилог

**Изјава о истоветности штампане и електронске
верзије докторског рада**

Потписани: Игор Бачкалов

Изјављујем да је електронска верзија моје докторске дисертације

НЕЛИНЕАРНО ВАЉАЊЕ БРОДА ПОД ДЕЈСТВОМ ВЕТРА И ТАЛАСА

коју сам предао за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума
Универзитета у Београду** истоветна штампаној верзији која се налази у фонду
Универзитетске библиотеке „Светозар Марковић“.

Потпис

У Београду, 6. X 2015.

Игор Бачкалов

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Изјављујем да је докторска дисертација под насловом

НЕЛИНЕАРНО ВАЉАЊЕ БРОДА ПОД ДЕЈСТВОМ ВЕТРА И ТАЛАСА

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да нисам кршио ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис:

У Београду, 6. X 2015.

Милош Банковић

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

НЕЛИНЕАРНО ВАЉАЊЕ БРОДА ПОД ДЕЈСТВОМ ВЕТРА И ТАЛАСА

која је моје ауторско дело.

Сагласан сам да електронска верзија моје дисертације буде доступна у отвореном приступу.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци. Кратак опис лиценци дат је на следећој страници.)

Потпис

Милор Јарковић

У Београду, 6. X 2015.

1. Ауторство - Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. Ауторство – без прераде. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.