

**Bruno Čalić, Anton Turk**

E-mail: aturk@riteh.hr

Faculty of engineering, University of Rijeka, Vukovarska 58, 51000 Rijeka

**Ivan Petrović**

SHIPBUILDING INDUSTRY SPLIT Inc., SPLIT (Brodosplit Inc.), Put Supavla 21,  
P.O. Box 517, HR-21000 SPLIT, CROATIA

---

## **Analiza stabiliteta broda za prijevoz ulja u neoštećenom i oštećenom stanju**

### **Sažetak**

Cilj ovoga rada je provjera rasporeda prostora (tankova) broda za prijevoz ulja nosivosti 59555 t. Za navedeni brod je provedena simulacija naplavljivanja jednog i više odjeljaka koristeći programski paket MAXSURF. U radu je dan i kratki teorijski prikaz determinističkog i probabilističkog pristupa stabilitetu broda u oštećenom stanju. Prikazani su kriteriji koji se odnose na stabilitet broda u neoštećenom i oštećenom stanju. Provjera stabiliteta broda u neoštećenom i oštećenom stanju je izvršena korištenjem različitih rutina koje nudi modul Hydromax u okviru MAXSURF programskog paketa. Analiza je izvršena je za neoštećeno stanje broda te za različite slučajeve oštećenja broda. Izvršena je i provjera propisanih kriterija klasifikacijskih društava za svako pojedinačno stanje.

**Ključne riječi:** stabilitet, oštećeno stanje

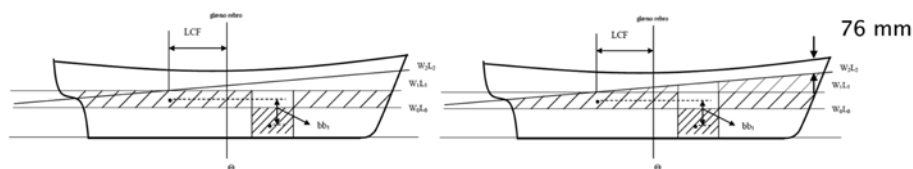
### **1. Uvod**

Jedno od važnih područja, kojima se bavi teorija broda odnosi se na plovnost i stabilitet. Pod pojmom plovnost podrazumijeva se osiguranje osnovnih uvjeta plovnosti u neoštećenom i oštećenom stanju plovila, dok se pod pojmom stabiliteta plovila podrazumijeva svojstvo plovila koje se odnosi na vraćanje u ravnotežni položaj nakon prestanka djelovanja opterećenja. Jedno od osnovnih svojstava koje mora posjedovati svako plovilo je da ima osigurane minimalne uvjete plovnosti i stabiliteta u neoštećenom i oštećenom stanju. Plovnost i stabilitet plovila ovise o brodskoj formi i razmještanju težina te o okolišnim uvjetima [1].

Do prodora vode u unutrašnjost broda dolazi kod oštećenja vanjske oplata uslijed sudara, nasukanja odnosno udaranja broda u obalu i sl. Posljedice prodora vode u plovilo može se analizirati primjenom jedne od dviju poznatih metoda: metoda izgubljenog uzgona ili metoda ukrcanog tereta [1].

Zbog posljedica prodora vode brod će plutati (i ploviti) u uvjetima nove plovnosti (novi gazovi, nova rezervna plovnost, nova početna poprečna metacentarska visina), te novog statičkog i dinamičkog stabiliteta (nova poluga statičkog stabiliteta, novi putevi dinamičkog stabiliteta). Nažalost, ponekad se događa da plovilo neće zadovoljiti uvjete plovnosti i/ili stabiliteta te će stoga potonuti odmah ili nakon nekog vremena zbog novih (pre)opterećenja na plovilu i posljedica okolišnih uvjeta za koje plovilo nema više dovoljne plovnosti i stabiliteta. Iako projektanti moraju osigurati minimalne uvjete propisane propisima klasifikacijskih društava to nije uvijek dovoljno za preživljavanje u slučaju posljedica oštećenja plovila.

Da bi se ograničio prodor vode tako da ne postane sudbonosan za brod, unutrašnjost brodskog trupa se pregrađuje poprečnim, katkad i uzdužnim pregradama, a ponekad i vodoravnim pregradama, na više nepropusnih odjeljaka. U slučaju oštećenja vanjske oplata broda, prodrla voda može prema tome ispuniti jedan ili više susjednih odjeljaka. Svrha proračuna stabiliteta broda u oštećenom stanju je da brod nakon prodora vode u brodski prostor (tank) ne izgubi plovnost i stabilitet. Kod toga se zahtijeva da vodna linija ne prijeđe granicu urona koja teče paralelno s palubom do koje sežu nepropusne pregrade, a 76 mm ispod njenog gornjeg brida (Slika 1) [2].



Slika 1/ Figure 1: Shematski prikaz oštećenja jednog tanka te vodne linije koja tangira granicu urona

Zadatak je odrediti trim i stabilitet broda kod prodora vode, za različite slučajeve oštećenja brodskog trupa.

## 2. Teorijsko razmatranje stabiliteta broda u oštećenom stanju

Proračun plovnosti i stabiliteta broda u oštećenom stanju potreban je da bi se odredio položaj (stanje) broda nakon oštećenja (nova vodna linija (gazovi, trim). Provjeru stabiliteta broda u oštećenom stanju potrebno je izvršiti kako bi se postigao minimalan stupanj sigurnosti nakon što dođe do oštećenja i prodora vode u brodske prostore, a za uvjete oštećenja propisane propisima klasifikacijskih društava.

Za procjenu ponašanja broda nakon oštećenja razvijena su dva pristupa i to:

- deterministički i
- probabilistički.

## 2.1. Deterministički pristup stabilitetu broda u oštećenom stanju

Krajem 19. stoljeća klasifikacijska društva usvojila su iskustvena pravila za raspored vodonepropusnih pregrada na trgovačkim brodovima (posebni vodonepropusni prostori: pramčani i krmeni pik, strojarnica, teretna skladišta/tankovi). Nakon toga dolazi do konstantnog zanimanja za vodonepropusnim podjelama međuprostora u konstrukciji broda, koji je potaknut pomorskim nesrećama kao što je *Titanic* (1912. godine).

Nakon toga pojavljuje se koncept granične linije (*margin line*) koja ne smije biti prekoračena nakon naplavlivanja prostora, a predloženog od *Britanskog odbora za trgovinu*. Sve do konvencije SOLAS 1948 jedini zahtjev za oštećeni brod je bio da se osigura dovoljan uzgon. Tada je usvojena zahtijevana pozitivna metacentarska visina u oštećenom stanju broda. Na SOLAS konferenciji 1960. godine, nakon nesreće broda *Andrea Doria*, usvaja se minimalna metacentarska visina u oštećenom stanju od 0,05 m. Ovo je prvi zahtjev na stabilitet broda u oštećenom stanju.

Od 1974. godine, SOLAS također uključuje obavezne zahtjeve za polugu stabiliteta u oštećenom stanju u minimalnom iznosu od 0,03 m.

U 1990. godini usvajaju se u SOLAS-u ukupni kriteriji stabiliteta za oštećeno stanje koji postaju poznati kao SOLAS 90, a opisani su u Pravilu 8 Poglavlja II-1.

Deterministički pristup temelji se na standardnim opsezima oštećenja, koja se protežu bilo gdje po duljini broda ili između poprečnih pregrada, ovisno o odgovarajućim zahtjevima. Posljedica takvog standardiziranja oštećenja je formiranje slučajeva oštećenja ili grupa slučajeva oštećenja, koja ovise o dimenzijama broda i unutarnjoj raspodjeli prostora.

Svaki slučaj oštećenja treba uzeti u obzir za svako stanje opterećenja i primijeniti kriterije koje treba poštivati. Postoje dvije poznate determinističke metode stabiliteta u oštećenom stanju:

- metoda izgubljenog uzgona,
- metoda ukrčanog tereta.

## 2.2. Probabilistički pristup stabilitetu broda u oštećenom stanju

U 1960-ima Kurt Wendel predstavlja koncept probabilističke metode za projektiranje podjele broda. Probabilistički pristup izvorno je razvijen 1974. godine proučavanjem podataka koji se odnose na sudare, prikupljenih od strane IMO-a i usvaja se rezolucijom A.267 (VIII). Tu su prikazani primjeri nesreća koji bi se mogli koristiti u poboljšanju rasporeda prostora/tankova broda. Najveći dio oštećenja dogodio se na pramčanom dijelu broda i logično da je to utjecalo na poboljšanja u pregrađivanju na pramcu više nego prema krmi [3].

Probabilistički koncept temelji se na statističkim podatcima o tome što se zapravo događa kada dođe do sudara odnosno oštećenja broda u smislu stanja mora i vremenskih

uvjeta općenito, veličine, dubine i mjesta oštećenja, brzine i smjera kretanja broda te dali je brod potonuo, ili nije, nakon sudara [3].

Klasifikacijska društva se sve više usmjeruju na probabilistički pristup u odnosu na raniji deterministički pristup kod kojega se pregrađivanje broda temelji na teorijskim načelima, naravno za one tipove brodova za koje postoji adekvatna statistika na kojoj se vjerojatnosti izračun zasniva. Probabilistička metoda uglavnom daje skup propisa koji se odnose na standarde i izračune standarda koji će se primjenjivati na brod ili dijelove broda [3].

Probabilistički pristup uveden je u SOLAS propise za putničke brodove 1978. g. protokolom SOLASA iz 1978. g. Probabilistički pristup uveden je u SOLAS 1990. g. i za teretne brodove, koji se odnosi na teretne brodove duljine 100 m i više, a odnosi se na brodove koji su izgrađeni od 1. veljače 1992 g. te brodove duljine između 80 m i 100 m od 1996. g. [3].

Od 1. siječnja 2009. g. na snagu su stupili novi zahtjevi za stabilitet u oštećenom stanju koji za razliku od prije uključuju i putničke brodove, Ro-Ro putničke brodove te teretne brodove veće od 80 metara (revidirani SOLAS dio B-1).

Efekte naplavlivanja broda ovise o brojnim faktorima i neizvjesnostima [4]:

- odjeljak ili grupa odjeljaka koji su poplavljeni
- gaz i stabilitet neoštećenog broda
- propusnosti poplavljenih odjeljaka
- stanje mora pri događanju nesreće
- kut ravne kobilice i asimetrična naplava.

Procjena vjerojatnosti opstanka broda uključuje sljedeće vjerojatnosti [4]:

- vjerojatnost naplavlivanja svakog odjeljka i svake grupe od dva ili više susjednih odjeljaka,
- vjerojatnost da je uzgon nakon naplavlivanja odjeljka (ili grupe susjednih odjeljaka) dovoljan za opstanak,
- vjerojatnost da je stabilitet nakon naplavlivanja odjeljka (ili grupe susjednih odjeljaka) dovoljan da spriječi prevrtanje ili opasno naginjanje zbog gubitka stabiliteta.

Proračun se temelji na vjerojatnosti preživljavanja nakon oštećenja, kao mjere sigurnosti broda u oštećenom stanju, a povezuje se sa indeksom pregrađivanja «A».

Proračun se temelji na određivanju vjerojatnosti oštećenja broda ( $p_i$ ) po zonama broda kao i vjerojatnosti da brod plovi nakon oštećenja ( $s_i$ ) za sve moguće kombinacije oštećenja.

Vjerojatnost preživljavanja broda može se izračunati zbrajanjem svih mogućih uvjeta oštećenja:

$$A = \sum_{i \in I} p_i \times s_i$$

Minimalni postignuti indeksi za svaki gaz ne smiju biti manji od 0,9R za putničke brodove i 0,5R za teretne brodove.

gdje:

- $i$  - predstavlja svaki pojedini odjeljak ili skupinu odjeljaka koji se razmatraju.
- $p_i$  - odgovara vjerojatnosti da će se naplaviti samo odjeljak ili grupa odjeljaka koji se razmatraju zanemarujući svako horizontalno pregrađivanje. Neovisan je o gasu ali uključuje faktor  $r$ .
- $s_i$  - odgovara vjerojatnosti preživljavanja nakon naplavlivanja odjeljka ili grupe odjeljaka koji se razmatraju uključujući učinak svakog horizontalnog pregrađivanja. Ovisi o gasu i uključuje faktor  $v$ .

### 2.3. Kriterij stabiliteta broda u neoštećenom stanju

Prema rezoluciji IMO A.749(18), kodeks o stabilitetu u neoštećenom stanju za sve vrste brodova koji su u skladu sa IMO propisima, minimalni zahtjevi za stabilitet su [5]:

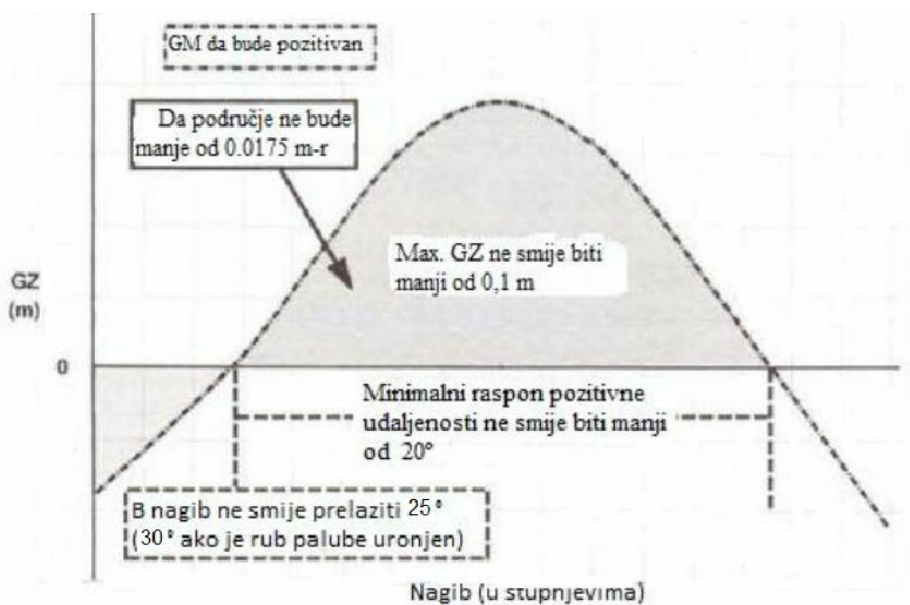
1. površina ispod krivulje poluge statičkog stabiliteta ne smije biti manja od 0,055 m-radijana do kuta nagiba  $\varphi=30^\circ$  i ne manja od 0,09 m-radijana do kuta nagiba  $\varphi=40^\circ$  ili kuta naplavlivanja ( $\varphi_n$ ), ako je ovaj kut manji od  $40^\circ$ . Pored toga, površina ispod krivulje poluge statičkog stabiliteta, između kuteva nagiba od  $30^\circ$  do  $40^\circ$  ili između  $30^\circ$  i  $\varphi_n$ , ako je ovaj manji od  $40^\circ$ , ne smije biti manja od 0,03 m-radijana.
2. poluga statičkog stabiliteta mora iznositi najmanje 0,20 m, pri kutu nagiba jednakom ili većem od  $30^\circ$ .
3. najveća poluga statičkog stabiliteta treba se nalaziti pri kutu nagiba po mogućnosti većem od  $30^\circ$ , ali ne manjem od  $25^\circ$ .
4. početna metacentarska visina ne smije biti manja od 0,15 m.

### 2.4. Kriteriji stabiliteta broda u oštećenom stanju

Prema Marpol Annex 1 Regulation 28 – pregrađivanje i stabilitet u oštećenom stanju [6], smatrat će se da su brodovi u skladu sa kriterijima stabiliteta u oštećenom stanju ako su ispunjeni slijedeći uvjeti (Slika 2):

1. konačna vodna linija uzimajući u obzir dodatni uron, bočni nagib i trim broda, mora biti ispod donjeg brida otvora kroz koji može doći do progresivnog naplavlivanja. Ti otvori uključuju cijevi za zrak pa i one zatvorene vodonepropusnim poklopcima i vratima, a ne uključuju vodonepropusne prolaze za ljude, male otvore za teret koji učestvuju u palubnoj čvrstoći i daljinski upravljana vodonepropusna vrata.
2. u završnoj fazi naplavlivanja, kut nagiba broda zbog nesimetričnog naplavlivanja ne smije biti veći od  $25^\circ$ , pod uvjetom da ne dolazi do uranjanja ruba palube taj se kut nagiba može povećati do  $30^\circ$ .

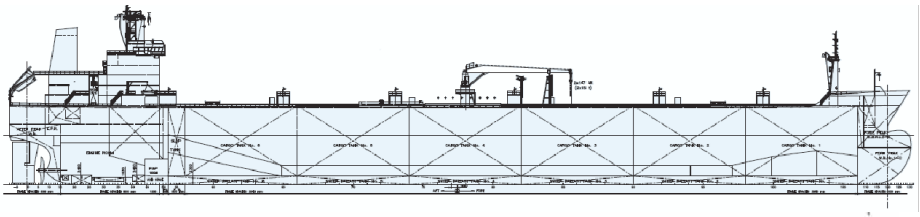
3. stabilitet u završnoj fazi naplavlivanja se provjerava i može se smatrati dovoljnim ako krivulja poluge stabiliteta ima pozitivan opseg barem  $20^\circ$  uz maksimalnu preostalu polugu u tom dijelu od najmanje 0,1 m, površina ispod krivulje unutar tog opsega ne smije biti manja od 0,0175 m-radijana. Nezaštićeni otvori ne smiju biti uronjeni u tom dijelu, ako je prostor u pitanju pretpostavlja se da ne smije biti potopljen.



Slika 2/Figure 2: Prikaz kriterija stabiliteta prilikom oštećenja broda

### 3. Provjera stabiliteta pomoću programskog paketa MAXSURF

U ovom poglavlju je izvršena provjera stabiliteta tankera tipa Panamax za prijevoz sirove i prerađene nafte (Slika 3) sljedećih glavnih karakteristika: duljina preko svega  $L_{OA} = 246,2$  m, duljina između okomica  $L_{BP} = 236$  m, širina 32,2 m, visina 20,4 m i gaz  $T = 12,2$  m, brzina 16 čv te snaga propulzije  $11000$  kW /  $127$  min<sup>-1</sup>. Stanje broda u polasku uključuje 100% tereta i 100% zaliha. Izvršena je još i provjera stabiliteta u oštećenom stanju broda sa različitim situacijama oštećenja. Treba napomenuti da je dubina oštećenja za sve simulacije takva da oštećenje obuhvaća i prostore tankova tereta uz opseg bočnog oštećenja B/5 ili 11.5 m ovisno o tome koja je vrijednost manja [7]. U radu je izvršena provjera stabiliteta broda za slučajeve oštećenja pojedinačnih tankova i kombinacije najviše dva susjedna tanka u slučaju da se oštećenje dogodilo baš na mjestu gdje se nalazi poprečna pregrada.



Slika 3/Figure 3: Uzdužni presjek broda Panamax tankera duljine LBP = 236 m

### 3.1. Hydromax analize

Nakon određivanja vrijednosti ulaznih podataka i provjere MAXSURF geometrijskog modela [8] broda, provedena je analiza. Ovdje su prikazane i opisane različite analize za koje je dostupna programska podrška u programu Hydromax:

- Upright Hydrostatics (hidrostatski podatci za uspravno stanje)
- Large Angle Stability (stabilitet pri većim kutovima nagiba)
- Equilibrium Analysis (analize ravnoteže)
- Specified Conditions (specificirani uvjeti)
- KN Values Analysis (određivanje KN vrijednosti)
- Limiting KG (određivanje graničnih vrijednosti KG)
- Tank Calibrations (baždarenje tankova)

Analiza stabiliteta pri većim kutovima nagiba omogućuje nam određivanje hidrostatskih parametara trupa sa ili bez zadanog trima ili s opcijom slobodnog trima. Rezultati analize stabiliteta kod velikih kutova odnose se na:

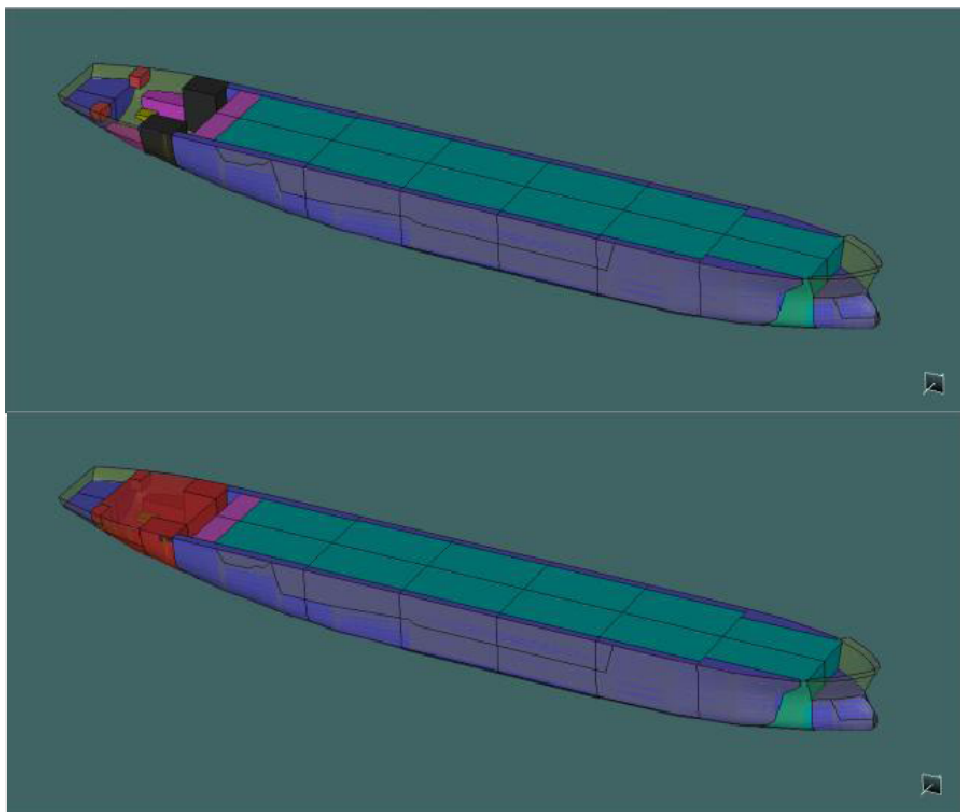
- tablice hidrostatskih podataka za svaki kut nagiba
- GZ krivulje
- procjenu kriterija stabiliteta
- kut progresivne naplave u odnosu na ključne točke, ruba palube i granične krivulja
- krivulje puta dinamičkog stabiliteta

Analiza ravnoteže omogućava određivanje gaza, nagiba i trima uslijed opterećenja danih u tablici stanja krcanja. Analiza se može provesti za stanje mirnog mora ili na valovima. Rezultati analize ravnoteže uključuju:

- hidrostatske podatke
- visinu nadvođa od ključnih točaka, ruba palube i granične krivulje
- procjenu kriterija
- vrijeme koraka animacije
- krivulju površine

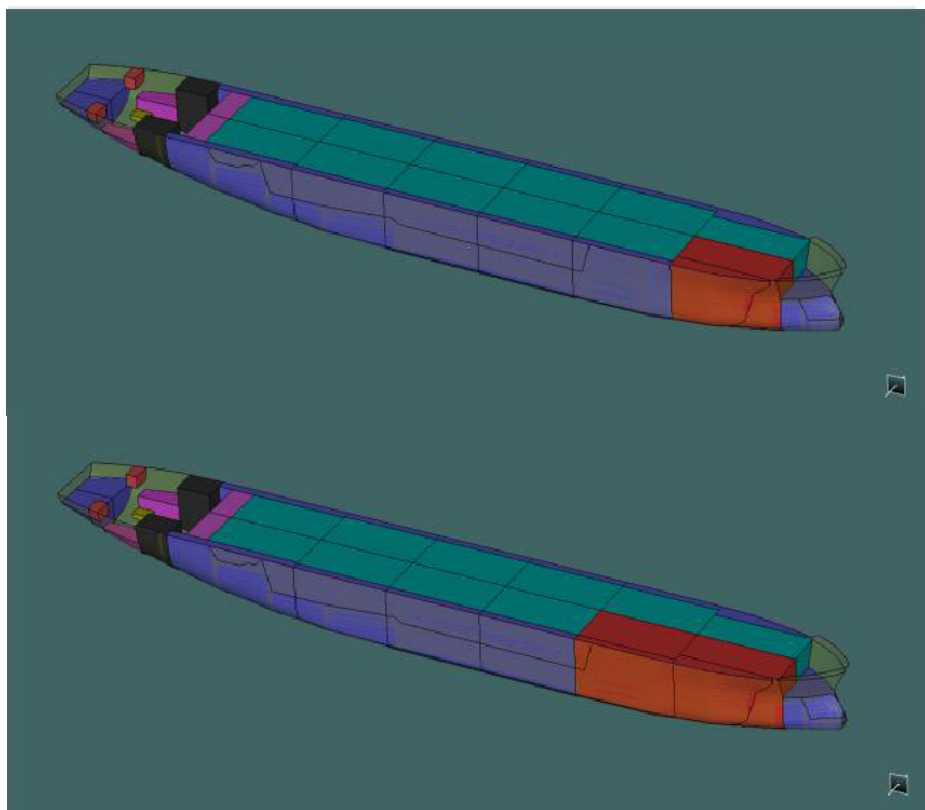
### 3.2. Stabilitet broda u neoštećenom stanju i za različite slučajeve oštećenja

U nastavku su prikazane slike pojedinih analiza za provjeru stanja stabiliteta neoštećenog broda i razne scenarije oštećenja. Radi opsežnosti prikazani su samo pojedinačni rezultati analize i to za slučaj istovremenog oštećenja TANKA 5 i TANKA 6 jer to predstavlja najgori mogući razmatrani scenarij (Slike 4 i 5).



*Slika 4/Figure 4: Prikaz neoštećenog stanja broda sa rasporedom tankova i s oštećenjem STROJARNICE*





Slika 5/Figure 5: Prikaz oštećenja TANKA 6 te TANKA 5 i TANKA 6

### 3.2.1. Slučaj oštećenja TANKA 5 i TANKA 6

Na slici 4b crvenom bojom prikazani su oštećeni brodski prostori za koje je provedena analiza. Rezultati pojedinih analiza prikazani su tablično (tablice 1 do 3) i grafički kriterij graničnih vrijednosti KG (Slika 6). Konačna masa iznosi 66517,81 t, položaj težišta po duljini 114,69 m, položaj težišta po širini -0,867 m, položaj težišta po visini 11,05 m, te moment uslijed slobodne površine 44412,72 tm.

Tablica 1/Table 1: Ključne točke poluge stabiliteta za slučaj oštećenja TANKA 5 i TANKA 6

Ključne točke	Kut uranjanja, °
Granična linija (mjesto uranjanja = 195,323 m)	23,1
Rub palube (mjesto uranjanja = 195,323 m)	23,2

Tablica 2/Table 2: Kriteriji za stanje ravnoteže za slučaj oštećenja TANKA 5 i TANKA 6 prema Marpol-u (Annex 1 Regulation 28)

Kriterij	Vrijednost	Jedinica	Stvarno	Status
<b>28.3.1 Uron palube pri statičkoj ravnoteži</b>				Zadovoljava
minimalno nadvođe	Palubna krivulja			
mora biti veće od (>)	0,000	m	6,788	Zadovoljava
<b>28.3.1 Točka naplavljivanja pri statičkoj ravnoteži</b>				Zadovoljava
minimalno nadvođe	Donji brid naplavljivanja			
mora biti veće od (>)	0,000	m	Kut naplave nije dostignut	Zadovoljava
<b>28.3.1 granica urona pri statičkoj ravnoteži</b>				Zadovoljava
minimalno nadvođe	Granica urona			
mora biti veće od (>)	0,000	m	6,712	Zadovoljava

Tablica 3/Table 3: Kriteriji stabiliteta broda za slučaj oštećenja TANKA 5 i TANKA 6 prema Marpol-u (Annex 1 Regulation 28) temeljeno na vrijednosti poluge statičkog stabiliteta

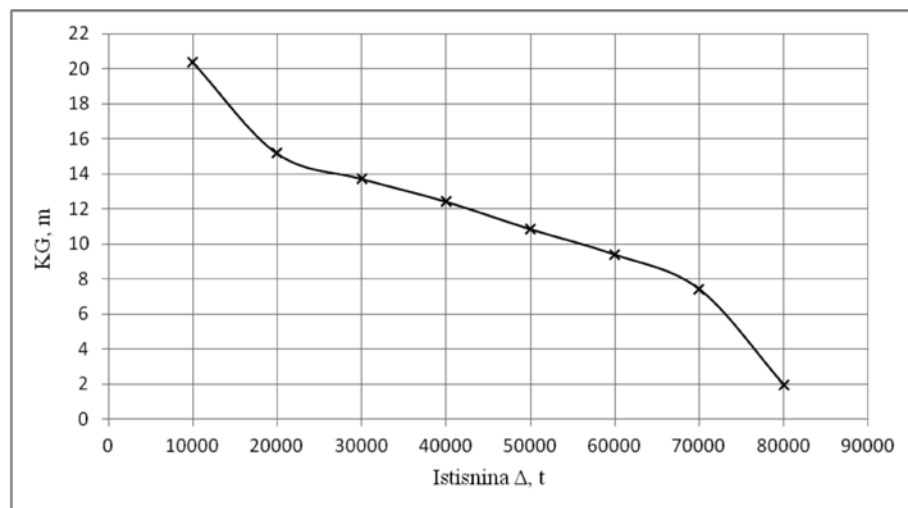
Kriterij	Vrijednost	Jedinica	Stvarno	Status	Više od zahtjeva %
<b>28.3.1 Vrijednost kuta statičke ravnoteže pri konačnoj vodnoj liniji</b>				Zadovoljen	
kut uranjanja granice urona	23,1	°	23,1		
kut uranjanja ruba palube	23,2	°			
prvi kut naplavljivanja	n/p	°			
ne snije biti veći od (<=)	100,000	%	19,886	Zadovoljen	+80,11
kut statičke ravnoteže		°	4,6		

Kriterij	Vrijednost	Jedinica	Stvarno	Status	Više od zahtjeva %
<b>28.3.2 Kut statičke ravnoteže <math>\leq 25</math> ili <math>\leq 30</math> ako rub palube ne započinje uranjati</b>				Zadovoljen	
vrijednost kuta statičke ravnoteže manji od:					
specificiranog kuta nagiba	25,0	°	25,0		
ne smije biti veći od ( $\leq$ )	100,000	%	18,347	Zadovoljen	+81,65
ili					
vrijednost bočnog kuta statičke ravnoteže manji od:					
specificiranog bočnog kuta nagiba	30,0	°			
kut uranjanja ruba palube	23,2	°	23,2		
ne smije biti veći od ( $\leq$ )	100,000	%	19,730	Zadovoljen	+80,27
kuta statičke ravnoteže		°	4,6		
<b>28.3.3 Opseg pozitivnog stabiliteta uključujući kut naplavlivanja</b>				Zadovoljen	
veći od					
kuta statičke ravnoteže	4,6	°	4,6		
do manji od					
prvog kuta naplave	n/p	°			
kut prestanka pozitivnog opsega stabiliteta	60,0	°	60,0		
ne smije biti manji od ( $\geq$ )	20,0	°	55,4	Zadovoljen	+177,07
<b>28.3.3 Preostala poluga statičkog stabiliteta</b>				Zadovoljen	
utvrđuje se kao veća vrijednost od					
kuta statičke ravnoteže	4,6	°	4,6		
do manje od					
specificiranog statičkog kuta bočnog nagiba	20,0 (24,6)	°	24,6		
kut pri maksimalnoj vrijednosti poluge (GZ)	38,2	°			
prvi kut naplavlivanja	n/p	°			
ne smije biti manji od ( $\geq$ )	0,100	m	0,778	Zadovoljen	+678,05

Kriterij	Vrijednost	Jedinica	Stvarno	Status	Više od zahtjeva %
kut pri kojem se ova poluga pojavljuje		°	24,6		
<b>28.3.3 Površina ispod poluge (GZ krivulje)</b>				Zadovoljen	
veća od					
kuta statičke ravnoteže	4,6	°	4,6		
do kuta manjeg od					
specificiranog kuta iznad kuta statičke ravnotežne	20,0 (24,6)	°	24,6		
prvi kut naplavljivanja	n/p	°			
kut prestanka pozitivnog opsega stabiliteta	60,0	°			
ne smije biti manja od ( $\geq$ )	1,0027	m. °	7,0148	Zadovoljen	+599,59

\* n/p – nije primjenjivo

### Granična KG krivulja



Slika 6/Figure 6: KG krivulja za slučaj oštećenja TANKA 5 i TANKA 6

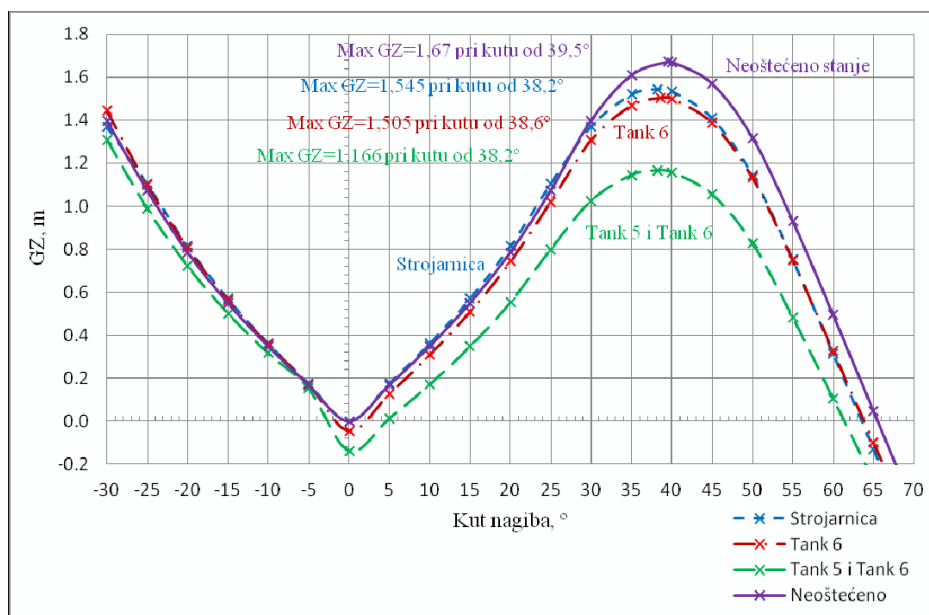
#### 4. Usporedba karakterističnih situacija oštećenja

Ovdje je prikazana usporedba nekih slučajeva oštećenja. Za usporedbu su uzeti slučajevi neoštećenog broda te slučajevi oštećenja „strojarnice“, „tanka 6“ te „tanka 5 i tanka 6“. Za usporedbu su prikazane poluge stabiliteta u pojedinim situacijama te vrijednosti stanja ravnoteže.

Iz dijagrama poluga stabiliteta (Slika 7) vidljivo je da za slučaj neoštećenog broda maksimalna vrijednost poluge statičkog stabiliteta iznosi  $GZ = 1,67 m$  kod kuta nagiba od  $\varphi = 39,5^\circ$ . Maksimalne vrijednosti poluga statičkog stabiliteta za ostale karakteristične slučajeve su slijedeće: slučaj oštećenja *Strojarnice* gdje je  $GZ = 1,545 m$  kod kuta nagiba  $\varphi = 38,2^\circ$ , slučaj oštećenja *Tanka 6* gdje je  $GZ = 1,505 m$  kod kuta nagiba  $\varphi = 38,6^\circ$  i slučaj oštećenja *Tanka 5 i Tanka 6* gdje je  $GZ = 1,166 m$  kod kuta nagiba  $\varphi = 38,2^\circ$ .

Iz dobivenih podataka vidi se da razlika vrijednosti poluge stabiliteta u slučaju oštećenja *tankova 5 i 6* u odnosu na početnu polugu stabiliteta kod neoštećenog stanja broda iznosi  $\Delta GZ = GZ_{neoštećeno} - GZ_{tanka5i6} = 0,504m$  što znači da se poluga smanjila za otprilike 30,2% u odnosu na početnu, dok je za druga dva slučaja ta vrijednost nešto manja (kod oštećenja *strojarnice* ona iznosi oko 7,5%, a kod oštećenja *Tanka 6* oko 9,9%).

Iz dijagrama, Slika 7, se vidi da je i opseg pozitivnog dijela poluge stabiliteta za neoštećeno stanje  $\varphi_1$  do  $\varphi_2 = 65,5^\circ$ , dok za ostale karakteristične slučajeve vrijedi: u slučaju oštećenja *Strojarnice*  $\varphi_1$  do  $\varphi_2 = 63,5^\circ$ , u slučaju oštećenja *Tanka 6*  $\varphi_1$  do  $\varphi_2 = 62,5^\circ$  i za slučaj oštećenja *Tanka 5 i Tanka 6*  $\varphi_1$  do  $\varphi_2 = 56,8^\circ$ . Iz ovih dobivenih podataka vidi se da je razlika vrijednosti opsega pozitivnog dijela poluge stabiliteta u slučaju oštećenja *tankova 5 i 6* u odnosu na početnu polugu stabiliteta kod neoštećenog stanja broda iznosi 8,7° što znači da se opseg pozitivne vrijednosti poluge smanjio za otprilike 13,3%, dok je za druga dva slučaja ta vrijednost nešto manja (kod oštećenja *strojarnice* ona iznosi oko 3,1%, a kod oštećenja *Tanka 6* oko 4,6%).



Slika 7/Figure 7: Usporedba nekih karakterističnih slučajeva [3].

Budući da je kod slučaja oštećenja *tankova 5 i 6* (što je ujedno i najgori slučaj) smanjenje poluge stabiliteta značajno, dobivena vrijednost poluge i dalje udovoljava propisima. Prema kriterijima za oštećeno stanje broda koji su prikazani u poglavlju 2.4 te na slici 2 vidi se sljedeće:

Kut nagiba broda zbog nesimetričnog naplavlivanja ne smije biti veći od  $25^\circ$ , ako ne dolazi do uranjanja ruba palube može se povećati do  $30^\circ$ .

Za odabrane karakteristične slučajeve vidimo da je:

- u slučaju oštećenja *Strojarnice* taj kut iznosi  $\varphi_1 = 0^\circ$
- u slučaju oštećenja *Tanka 6* taj kut iznosi  $\varphi_1 = 1,3^\circ$
- u slučaju oštećenja *tankova 5 i 6* taj kut iznosi  $\varphi_1 = 4,6^\circ$

Opseg pozitivne vrijednosti poluge stabiliteta mora iznositi minimalno  $20^\circ$  s maksimalnom preostalom polugom od 0,1 m.

Za odabrane karakteristične slučajeve slijedi:

- u slučaju oštećenja *Strojarnice* gdje opseg pozitivnog dijela iznosi  $\Delta\varphi = 63,5^\circ$  preostala poluga stabiliteta iznosi 0,814 m.
- u slučaju oštećenja *Tanka 6* gdje opseg pozitivnog dijela iznosi  $\Delta\varphi = 62,5^\circ$  preostala poluga stabiliteta iznosi 0,810 m.
- u slučaju oštećenja *tankova 5 i 6* gdje opseg pozitivnog dijela iznosi  $\Delta\varphi = 56,8^\circ$  preostala poluga stabiliteta iznosi 0,778 m.

Površina ispod krivulje GZ unutar toga opsega ne smije biti manja 0,0175 m rad (odnosno 1,0027 m<sup>-°</sup>).

Za odabrane karakteristične slučajeve vidljivo je:

- u slučaju oštećenja Strojarnice ta površina iznosi 7,5307 m<sup>-°</sup>
- u slučaju oštećenja Tanka 6 ta površina iznosi 7,4766 m<sup>-°</sup>
- u slučaju oštećenja tankova 5 i 6 ta površina iznosi 7,0145 m<sup>-°</sup>

Prema kriterijima za neoštećeno stanje broda koji su prikazani u poglavlju 2.3 vidi se sljedeće:

Površina ispod krivulje poluga statičkog stabiliteta ne smije biti manja od 0,055 m-radijana (odnosno 3,1513 m<sup>-°</sup>) do kuta nagiba  $\varphi=30^\circ$  i ne manja od 0,09 m-radijana (odnosno 5,1566 m<sup>-°</sup>) do kuta nagiba  $\varphi=40^\circ$ , te između kutova nagiba od  $30^\circ$  do  $40^\circ$  ne smije biti manja od 0,03 m-radijana (odnosno 1,7189 m<sup>-°</sup>). u slučaju oštećenja *Strojarnice* te površine iznose:

do $\varphi=30^\circ$	A=18,0490 m <sup>-°</sup>
do $\varphi=40^\circ$	A=33,8821 m <sup>-°</sup>
između $\varphi=30^\circ$ i $\varphi=40^\circ$	A=15,8331 m <sup>-°</sup>

Poluga statičkog stabiliteta GZ mora iznositi najmanje 0,20 m, pri kutu nagiba jednakom ili većem od  $30^\circ$ .

$$GZ_{\min}=0,2 \text{ m pri kutu } \varphi=30^\circ \quad GZ_{\text{stvarni}}=1,398 \text{ m}$$

Najveća poluga statičkog stabiliteta treba se javiti pri kutu nagiba po mogućnosti iznad  $30^\circ$ , ali ne manjem od  $25^\circ$ .

$$GZ_{\max}=1,67 \text{ m pri kutu } \varphi=39,5^\circ$$

Početna metacentarska visina ne smije biti manja od 0,15 m

$$M_0G_{\min}=0,15 \text{ m} \quad M_0G_{\text{stvarno}}=1,913 \text{ m}$$

Proračun hidrostatskih podataka temeljen je na metodi izgubljenog uzgona.

Stanja opterećenja broda u neoštećenom stanju odnose se na pune tankove tereta.

Nakon oštećenja tankova tereta dolazi do:

- istjecanja tekućeg tereta iz dijelova tankova koji se nalaze iznad trenutačne vodne linije;
- te do zamjene tekućeg tereta u tankovima okolnom tekućinom.

Kao posljedica ovakvog procesa je da brod nakon oštećenja djelomično izroni zbog smanjenja ukupne težine broda na kraju procesa istjecanja tekućeg tereta iz broda i izmjene tekućina u oštećenim tankovima.

Posljedica istjecanja tekućeg tereta koji se nalazi iznad trenutačne vodne linije utječe na smanjenje ukupne težine broda u odnosu na stanje prije oštećenja, dok izmjena fluida ispod vodne linije ima za posljedicu povećanje odnosno smanjenje ukupne težine broda ovisno o razlici gustoća tekućeg tereta i okolnog fluida. Kako se najčešće radi o

tekućem teretu manje gustoće od gustoće okolnog fluida, izmjenom fluida ispod vodne linije, dolazi do povećanja ukupne težine broda. Međutim, to povećanje je znatno manje od smanjenja težine zbog izgubljenog tekućeg tereta kojeg više nema iznad konačne vodne linije. Za naša razmatrana stanja opterećenja vidljivo je da se istisnina broda pri oštećenju tanka 6 smanjila na 71659 t, za slučaj oštećenja tankova 5 i 6 smanjila na 66511 t, (Tablica 10). Za slučaj oštećenja strojarnice istisnina ostaje nepromijenjena u odnosu na neoštećeno stanje broda (zbog primijenjene metode izgubljenog uzgona).

Općenito, iz propisa klasifikacijskih društava je vidljivo da se brodovi, a vezano za određivanje tabličnog nadvođa dijele na brodove tipa A i brodove tipa B i bitno su različiti pogotovo pri velikim dužinama brodova. Tablična nadvođa za brodove tipa A su bitno manja u odnosu na brodove tipa B [9].

Primjer tabličnog nadvođa za brod tipa A i tipa B dužine 365 m:

Za brod tipa A minimalno tablično nadvođe iznosi 3433 mm, dok za brod tipa B minimalno tablično nadvođe iznosi 5303 mm. Dakle u ovom slučaju se radi o razlici od 1870 mm.

U tablici 4.1 prikazana je usporedba podataka za stanje ravnoteže kod karakterističnih slučajeva oštećenja.

Tablica 10/Table 10: Tablica usporedbe stanja ravnoteže nekih karakterističnih slučajeva

	Neoštećeno	Strojarnica	Tank 6	Tank 5 i Tank 6
Gaz na glavnom rebru, m	12,229	12,714	12,212	12,293
Istisnina $\Delta$ , t	75708	75711	71659	66511
Kut nagiba nadesno, °	0,0	0,0	1,4	4,5
Gaz na pramcu FP, m	12,187	11,207	12,105	12,372
Gaz na krmi AP, m	12,272	14,222	12,318	12,213
Gaz na na LCF, m	12,231	12,686	12,220	12,283
Trim (pozitivan prema krmi), m	0,086	3,015	0,213	-0,159
Duljina vodne linije $L_{VL}$ , m	241,893	242,511	241,893	241,893
Širina vodne linije $B_{VL}$ , m	32,203	32,201	32,213	32,302
Oplakana površina $S$ , m <sup>2</sup>	11246,105	11553,970	11239,841	11276,921
Površina vodne linije $A_{VL}$ , m <sup>2</sup>	6870,027	6464,641	6517,878	6077,780
Prizmatički koeficijent $C_p$	0,791	0,735	0,749	0,689
Koeficijent punoće istisnine $C_B$	0,773	0,679	0,724	0,639
Koeficijent punoće glavnog rebra $C_M$	0,980	0,980	0,966	0,934
Koeficijent punoće vodne linije $C_{VL}$	0,882	0,828	0,836	0,778
LCB od AP (pozitivan prema pramcu), m	124,183	124,113	119,376	114,698
LCF od AP (pozitivan prema pramcu), m	114,420	120,171	109,239	104,198



	Neoštećeno	Strojarnica	Tank 6	Tank 5 i Tank 6
KB m	6,480	6,687	6,462	6,522
KG fluid, m	11,726	11,726	11,728	11,717
BMt m	7,158	7,065	7,269	7,233
BML m	368,569	319,031	342,155	331,016
GMt korekcija, m	1,913	2,025	1,995	1,969
GML korekcija, m	363,324	313,992	336,881	325,752
KMt m	13,639	13,751	13,731	13,755
KML m	375,049	325,718	348,617	337,538
Uron (TPc), t/cm	70,418	66,263	66,808	62,297
MTc t.m	1165,525	1007,313	1022,907	918,059
RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1) tm	2527,632	2675,672	2494,869	2285,774
Maksimalni nagib palube, °	0,0	0,7	1,4	4,5
Kut trima (pozitivan prema krmi) °	0,0	0,7	0,1	0,0

## 5. Zaključak

U ovome radu prvenstveno je analiziran i prikazan stabilitet broda u oštećenom stanju: prikazan je osnovni princip probabilističkog i determinističkog pristupa. Prikazani su kriteriji stabiliteta koji se odnose na stabilitet broda u neoštećenom stanju te kriteriji koji se provjeravaju za slučajeve oštećenja. Za proračun stabiliteta korišten je programski paket Maxsurf za modeliranje geometrije broda te njegov modul Hydromax za proračun stabiliteta. Analiza stabiliteta izvršena je korištenjem različitih alata koje nudi modul Hydromax, a izvršena je za neoštećeno stanje broda te za različite slučajeve oštećenja. Svi dobiveni rezultati prikazani su u tablicama i dijagramima te je izvršena i provjera propisanih kriterija za svako pojedinačno stanje. U zadnjem poglavlju izvršena je usporedba nekoliko karakterističnih slučajeva stanja broda. Karakteristična stanja broda odnose se na: neoštećeno stanje broda; oštećenje prostora strojarnice; oštećenje tanka 6; te oštećenje tankova 5 i 6. Iz dijagrama krivulja poluga stabiliteta kod karakterističnih slučajeva oštećenja vidljivo je da je dakako najnepovoljniji slučaj kada su oštećeni tankovi 5 i 6 ali brod i u tome stanju zadovoljava kriterije stabiliteta za oštećeno stanje. Svrha je proračuna nepotonivosti odrediti razmak nepropusnih pregrada tako da u slučaju oštećenja vanjske oplata i nastalog prodora vode brod ne izgubi svojstvo plovnosti i stabiliteta. U ovom slučaju radi se o brodu sa definiranim razmakom pregrada za koje je izvršena provjera stabiliteta u oštećenom stanju prema pravilima Marpol-a (Annex 1 Regulation 28). Na kraju svega može se reći da je trenutni raspored pregrada na brodu zadovoljavajući za sve promatrane slučajeve oštećenja. Daljnji rad odnosiće se na provjeru stabiliteta Panamax kontejnerskog tipa uključujući revidirana pravila SOLAS-a (Dio B-1) za vjerojatnosni pristup stabilitetu u oštećenom stanju.

## Literatura

1. J. Uršić „Stabilitet broda I“ Zagreb 1991. Sveučilišna naklada d.o.o. Zagreb
2. J. Uršić „Stabilitet broda II“ Zagreb 1991. Sveučilišna naklada d.o.o. Zagreb
3. [http://www.imo.org/blast/contents.asp?topic\\_id=246&doc\\_id=799](http://www.imo.org/blast/contents.asp?topic_id=246&doc_id=799)
4. T. A. Santos, C. Guedes Soares „Probabilistic Approach to Damage Stability“, Advanced ship design for pollution prevention, 227-243. 2010.
5. IMO Res. A.749(18), 1993.
6. Marpol Annex 1 Regulation 28, 1983.
7. Hrvatski registar brodova, Dio 5. Pregrađivanje, Poglavlje 11. 2007.
8. MAXSURF Modeller, Hydromax Stability software user manual, 2012.
9. Hrvatski registar brodova, Dio 6. Nadvođe, Tablica 4.1.2.3 i Tablica 4.1.3.2

Bruno Čalić, Anton Turk, Ivan Petrović

## Intact and Damage Stability of the Oil Carrier

### Abstract

The aim of this paper is to control the ship design partitioning (spaces - tanks) for the oil carrier (59555 t). For a given ship a flooding simulation is conducted on one or more compartments using the software package MAXSURF. The paper presents in brief a theoretical discussion of deterministic and probabilistic approach to damage stability of the ship. The criteria relating to the stability of the ship are shown for the cases of an intact and damaged ship. Stability check is performed using different analysis routines offered by the Hydromax modul of the MAXSURF software, which was conducted for the intact condition of the vessel and for the different cases of damage scenarios. The defined criteria of classification societies for each individual condition was performed and evaluated.

**Key words:** stability, damage condition

