Stabilnost putničkog broda u oštećenom stanju

Medić, Marko

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, Faculty of Maritime Studies / Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:164:237702

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository - Faculty of Maritime Studies - Split - Repository - Faculty of Maritime Studies Split for permanent storage and preservation of digital resources of the institution







SVEUČILIŠTE U SPLITU

POMORSKI FAKULTET

MARKO MEDIĆ

STABILNOST PUTNIČKOG BRODA U OŠTEĆENOM STANJU

ZAVRŠNI RAD

SPLIT, 2017.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
POMORSKI FAKULTET

STUDIJ: POMORSKA NAUTIKA

STABILNOST PUTNIČKOG BRODA U OŠTEĆENOM STANJU

ZAVRŠNI RAD

MENTOR:

Dr.sc. Goran Belamarić, kap.

STUDENT:

Marko Medić
(MB: 0246049337)

SPLIT, 2017.

SAŽETAK

U posljednje vrijeme povećava se potreba za putničkim brodovima, a to se posebno odnosi na brodove za kružna putovanja. Zbog toga se grade sve veći i moderniji brodovi za kružna putovanja koji prevoze sve veći broj putnika, i upravo zbog toga najviše pažnje posvećuje se sigurnosti tih brodova. U ovom radu pozornost je posvećena pravilima za stabilitet broda u oštećenom stanju i metodama za izračun istog. Metode korištene za izračun su deterministička i vjerojatnosna. Na kraju rada prikazan je primjer najveće pomorske nesreće u novijoj povijesti.

Ključne riječi: putnički brodovi, kriteriji stabilnosti brodova, stabilitet brodova u oštećenom stanju, index A

ABSTRACT

The need for passenger ships has increased recently, especially for cruise ships. Because of an increasing number of passengers there is a need for more and more modern cruise ships. For this reason most attention is paid to the safety of these ships. In this work, attention is paid to the rules for ship stability in the damaged condition and methods for calculating it. The methods used for the calculation are deterministic and probabilistic. At the end of the work is presented an example of the biggest maritime accident in recent history.

Key words: Passenger ships, Ship's intact stability criteria, Stability of Vessels in Damaged Condition, index A

SADRŽAJ

1 UVOD 1

2 STABILITET PUTNIČKIH BRODOVA U OŠTEĆENOM STANJU 2

2.1 PRAVILA ZA STABILITET PUTNIČKIH BRODOVA 2

2.2 KRITERIJI ZA BROD U OŠTEĆENOM STANJU 4

3 METODE ZA PRORAČUN STABILITETA BRODA U OŠTEĆENOM STANJU 8

3.1 VJEROJATNOSNA METODA 9

4 NAPLAVLJIVANJE BRODSKIH PROSTORA I PREGRAĐIVANJE PUTNIČKIH BRODOVA 15

4.1 NAPLAVLJIVANJE BRODSKIH PROSTORA 15

4.1.1 Prvi slučaj: prostor ima vodonepropusni krov, a voda ispunjava cijeli taj prostor 16

4.1.2 Drugi slučaj: prostor je s gornje strane otvoren ili je napunjen vodom djelomično, a nema spoja s vanjskom vodom 17

4.1.3 Treći slučaj: prostor zbog prodora vode ili otvorenog ventila ima stalan spoj s vanjskom vodom i može se slobodno širiti u visnu 17

4.2 PREGRAĐIVANJE PUTNIČKIH BRODOVA 19

4.3 VRSTE I POLOŽAJ VODONEPROPUSNIH VRATA 22

5 PRIMJER NESREĆE COSTA CONCORDIE 24

5.1 OPĆENITO O COSTA CONCORDIE I NESREĆI 24

5.2 SIMULACIJA NAPLAVLJIVANJA 28

6 ZAKLJUČAK 33

LITERATURA 34

POPIS SLIKA 35

POPIS TABLICA 36

1 UVOD

Putnički brodovi su brodovi trgovačke mornarice namjenjeni za prijevoz više od 12 putnika. Ponekad se grade i u kombinaciji s brodovima za generalni teret pa tako nastaju putničko-teretni ili teretno-putnički brodovi.

Putnički brodovi mogu se podijeliti na linijske i na izletničke brodove. Linijski brodovi uglavnom povezuju otoke s kopnom, a vrste i karakteristike ovise o području plovidbe. Veliki broj putničkih brodova i trajekata plovi većinom između većih gradova sjeverne i zapadne Europe te prevoze milijone putnika svake godine. Većina tih brodova su tzv. roll-on-roll-off izvedba i prevoze istovremeno i teret i putnike. Neki od njih mogu prevoziti i preko 3000 putnika. Njihova je karakteristika (i problem gradnje) da je glavna paluba (najduža neprekinuta paluba koja zatvara trup broda od pramca do krme i od boka do boka) vrlo nisko iznad vodene linije. Drugu poteškoću za gradnju broda stvara velika garaža u kojoj može doći do pomaka tereta, tj. vozila pri čemu može doći do ozbiljnog poremećaja stabilnosti. Za kružna putovanja se koriste tzv. *cruiseri* koji mogu biti raznih veličina. Njih karakterizira komfor i mnoge mogućnosti za bavljenje raznim aktivnostima za putnike. Neki od njih spadaju među najveće brodove svijeta.

Posljednih godina dogodio se veliki broj ozbiljnih nesreća putničkih brodova, koje su rezultirale velikim gubitkom života, ali su dovele i do stvaranja stručnih internacionalnih tijela koja su započela razmatrati ovaj problem. Iako je postotak nesreća putničkih brodova malen u odnosu na ukupan broj pomorskih nesreća, ozbiljnost je u tome što je u pitanju velikih broj ljudskih žrtava. Velika pažnja kod projektiranja broda posvećuje se tome da se sačuva stabilitet broda u različitim stanjima što omogućava dodatno vrijeme evakuacije putnika na brodu. Za evakuaciju putnika s većih putničkih brodova potrebno je više od dva sata i to po dobrih vremenskim uvjetima što nam pokazuje koliko je bitno da brod zadrži stabilitet u oštećenom stanju.

2 STABILITET PUTNIČKIH BRODOVA U OŠTEĆENOM STANJU

2.1 PRAVILA ZA STABILITET PUTNIČKIH BRODOVA

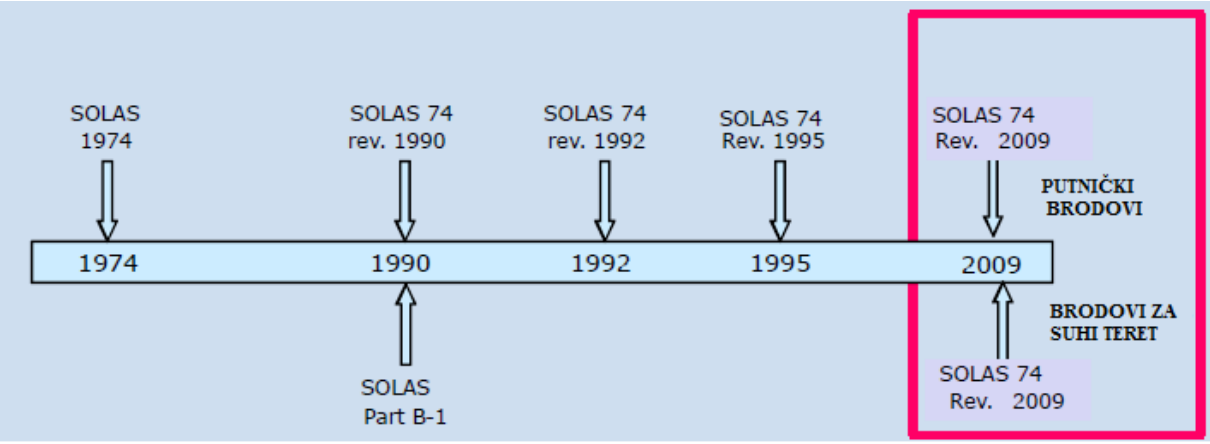
Jedno od glavnih svojstava kroz povijest gradnje brodova po kojem se mjerila sigurnost istih bio je stabiltet. Brodovi u neoštećenom stanju moraju imati dovoljnu stabilnost, moraju biti što efikasnije pregrađeni u svrhu osiguravanja uzgona i stabiliteta nakon sudara ili oštećenja. Na samom početku razvoja brodova, propisani zahtjevi za stabilitet broda od strane meritornih tijela, bili su prilično mali. Danas su zahtjevi veći, a postavljeni su od Međunarodne pomorske organizacije (International Maritime Organization – IMO).

Prva pravila za oštećeni brod uvedena su kao posljedica konvencije SOLAS koja je održana 1914. god. nakon tragedije RMS "Titanic"-a. Nakon toga krenule su revizije 1929. godine, 1948. godine, 1960. godine te 1974. godine. Ova posljednja je postala i ostala baza za sve buduće promjene, i poznatija je kao SOLAS '74. Načelo donošenja novih pravila je u donošenju amandmana koji dolaze na snagu na određeni datum. Prije samog dolaska na snagu, zainteresirane strane moraju provjeriti i odobriti taj amandman. Kao rezultat takvog načina ažuriranja pravila, današnja verzija je i dalje SOLAS '74, s amandmanima.

Prva pravila na osnovi vjerojatnosti za putničke brodove sadržana su u IMO rezoluciji A.265 , a uvedena su 1967. godine kao alternativa deterministčkim pravilima SOLAS '60. Za većinu ro-ro putničkih brodova ova pravila stroža su od deterministčkih zahtijeva sadržanih u SOLAS '60, te se uglavnom nisu primjenjivala kao obavezna. [4]

1992. godine uvedena je IMO rezolucije MSC.19(58) u SOLAS kao dio B-1, u poglavlju II-1, koji sadržava standard stabiliteta za teretne brodove na vjerojatnosnoj osnovi preživljavanja broda nakon sudara. Referentna veličina je koeficijent pregrađivanja *A.*

Međunarodna pomorska organizacija (IMO) 2006. godine u rezoluciji MSC.216(82) prihvatila je opsežan amandman na SOLAS poglavlje II-1, koji se odnosi na zahtjeve stabiliteta broda u oštećenom stanju te duljinu pregrađivanja za teretne i putničke brodove. Cilj rezolucije je pregrađivanje broda na najučinkovitiji mogući način s obzirom na njegovu namjenu.



Slika 1. Glavni kriteriji stabiliteta u oštećenom stanju za putničke brodove po SOLAS-u 90 [6]

2008. godine objavljena je rezolucija IMO MSC.281(85) - lista pojašnjenja SOLAS poglavlju II-1, a odnose se na pregradnu dužinu i stabilitet u oštećenom stanju. Pomorski odbor za sigurnost (Maritime safety committee - MSC) u rezoluciji je predvidio nove dopune i pojašnjenja vjerojatnosnog pristupa stabilitetu oštećenog broda. Filozofija vjerojatnosnog koncepta tvrdi da su dva broda s istim postignutim indeksom pregrađivanja A jednako sigurna, i da stoga nema potrebe za dodanim zahtjevima ili specijalnim tretmanom određenih dijelova broda. Područja koja se posebno razmatraju su pramac i dno, te oba imaju priložena posebna pravila pregrađivanja za slučajeve bočnog oštećenja i nasukavanja. [5]

2.2 KRITERIJI ZA BROD U OŠTEĆENOM STANJU

U svim uvjetima plovidbe mora se osigurati takav stabilitet u neoštećenom stanju koji će omogućiti da brod izdrži konačnu fazu naplavljivanja bilo kojeg glavnog odjeljka za koji je propisano da se nalazi unutar naplavljive duljine.
Ako su dva susjedna glavna odjeljka odvojena stepenastom pregradom, stabilitet u neoštećenom stanju mora biti takav da brod izdrži naplavljivanje ta dva susjedna odjeljka.
Ako je potrebni faktor pregrađivanja 0,50, stabilitet u neoštećenom stanju mora biti takav da brod izdrži naplavljivanje bilo koja dva susjedna odjeljka.

1.Stabilitet koji se zahtijeva u konačnom stanju nakon oštećenja i nakon izravnavanja broda, ako je isto predviđeno, određuje se na sljedeće načine.

a) Pozitivni dio krivulje poluga stabiliteta nakon oštećenja mora imati opseg od najmanje 15 ° iznad kuta ravnoteže. Taj se opseg može smanjiti na najmanje 10 °, ako je površina ispod krivulje poluga stabiliteta jednaka onoj određenoj u točki b), pomnoženoj s omjerom 15/opseg, pri čemu je opseg izražen u stupnjevima.

b) Površina ispod krivulje poluge momenta stabiliteta iznosi najmanje 0,015 metarradijana, mjereno od kuta ravnoteže do manjeg među dalje navedenima:
i) kut pri kojem dolazi do progresivnog napajanja; ili
ii) 22 stupnja (mjerena od okomice) u slučaju naplavljivanja jednog odjeljenja,
iii) 27 stupnjeva (mjerenih od uspravnog položaja) u slučaju istovremenog naplavljivanja dvaju ili više susjednih odjeljenja.

c) Preostalu vrijednost poluge momenta stabiliteta (GZ), dobije se iz raspona određenog točkom (1)(a), kada je se određuje pomoću formule

$$\text{GZ (m)} = \frac{moment\ poprečnog\ nagiba\ (t.\ m) + 0.04}{istitnina\ (t)}$$

pri čemu se moment poprečnog nagiba uzima kao najveća vrijednost do koje dođe zbog bilo kojeg od sljedećih učinaka:
i) okupljanje svih putnika na jednom boku
ii) spuštanje svih potpuno opterećenih plovila za preživljavanje pomoću soha, na jednom boku

iii) opterećenjem vjetra na jednoj strani broda; pri čemu ni u jednom slučaju tako određena vrijednost GZ neće iznositi manje od 0.10 metara.

d) U svrhu izračuna momenta poprečnog nagiba u točki (1)(c), potrebno je pretpostaviti sljedeće:

i) Moment uslijed okupljanja putnika na jednom boku
- 4 osobe po kvadratnom metru
- masa od 75 kg po putniku
- putnici se raspoređuju po raspoloživim površinama palube na jednom boku broda, na palubama na kojima se nalaze mjesta okupljanja tako da se ostvari najnepovoljniji moment poprečnog nagibanja.

ii) Moment zbog spuštanja svih potpuno opterećenih plovila za preživljavanje pomoću soha, na jednom boku.

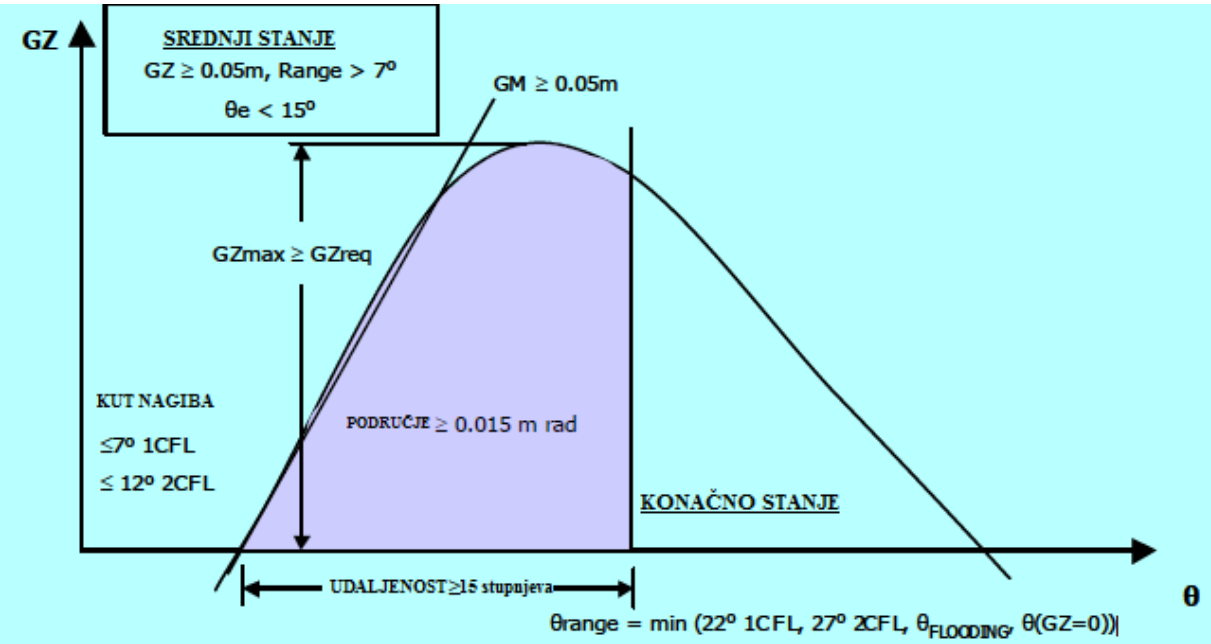
iii) Momenti zbog pritiska vjetra:
kao površina za proračun primjenjuje se projicirana lateralna površina broda iznad vodne linije koja odgovara neoštećenom stanju.

2. Konačno stanje broda nakon oštećenja i, u slučaju asimetričnog naplavljivanja, nakon što se poduzmu mjere izjednačavanja biti će sljedeće:

a) u slučaju simetričnog naplavljivanja ostat će pozitivna rezervna metacentarska visina od najmanje 50 milimetara, što je izračunato metodom konstante istisnine;

b) u slučaju asimetričnog naplavljivanja kut nagiba pri naplavljivanju jednog odjeljenja neće biti veći od 7 stupnjeva. Kod istovremenog naplavljivanja dvaju ili više susjednih odjeljenja dozvoljen je nagib od 12 stupnjeva; i

c) ni u jednom slučaju ne smije doći do potonuća granične linije urona u zadnjem stadiju naplavljivanja.



Slika 2. Rezerva stabiliteta putničkog broda u oštećenom stanju izgrađenog nakon 29. Travnja 1990 [6]

3. U srednjem stadiju naplavljivanja ne smije doći do potonuća granične linije urona osim u slučaju djelomične podjele broda na vodonepropusne pregrade iznad granične linije urona (poput djelomičnih pregrada ili okvirnih rebara) koja u dovoljnoj mjeri ograničava protok vode duž palubnu pregradu i rezultira kutom nagiba ne većim od 15 stupnjeva. U slučaju da brod na pregradnoj palubi prevozi vozila, kut nagiba u srednjem stadiju naplavljivanja neće biti veći od onog koji će uzrokovati potonuće granične linije urona;

a) kada dođe do velikog progresivnog naplavljivanja, odnosno kad ono uzrokuje brzo smanjivanje poluge momenta stabiliteta od 0,04 metra ili više, smatra se da se krivulja poluge momenta stabiliteta prekida pod kutom pri kojem dolazi do progresivnog naplavljivanja, a raspon i područje o kojima se govori u točkama (1)(a) i (b) treba mjeriti do tog kuta; i

b) u slučajevima kada je progresivno naplavljivanje ograničeno i koje ne traje neprekinuto i uzrokuje prihvatljivo polagano umanjenje poluge momenta stabiliteta na manje od 0,04 metra, ostatak ove krivulje biti će djelomično smanjenog nagiba zbog pretpostavke da je progresivno naplavljen prostor tako naplavljen od početka.

c) U međufazama naplavljivanja, maksimalna poluga stabiliteta mora biti najmanje 0,05 metara, a opseg pozitivnih poluga stabiliteta mora biti najmanje 7 °. U svakom slučaju, treba pretpostaviti samo jedno oštećenje trupa i samo jednu slobodnu površinu.

U proračunima stabiliteta broda u oštećenom stanju primjenjuju se ove vrijednosti prostorne i površinske naplavljivosti:

Tablica 1. Prostori i njihova naplavljivost [7]

Prostor	Naplavljivost (%)
Predviđen za teret ili zalihe	60
Zauzet nastambama	95
Zauzet strojevima	85
Namijenjen za tekućine	0 ili 95 (*)
(*) ovisno o tome što uzrokuje strože zahtjeve.	

Pretpostavljeni opseg oštećenja jest:
1. u uzdužnom smjeru: 3,0 metra uvećana za 3 % duljine broda ili 11,0 metara ili 10 % duljine broda, ovisno o tome koja vrijednost manja;
2. u poprečnom smjeru (mjereno od boka broda prema unutra, okomito na ravninu središnjice broda na visini najviše pregradne teretne linije): udaljenost jednaka petini širine broda; i
3. u vertikalnom smjeru: od osnovice neograničeno prema gore;
4. ako bi bilo koje oštećenje manjih razmjera od onih navedenih u točkama 1., 2., 3. moglo uzrokovati teže uvjete u pogledu poprečnog nagiba ili smanjenja metacentarske visine, takvo oštećenje treba uzeti u obzir prilikom proračuna.

Granična linija urona (eng. Margin Line) je crta označena najmanje 76 mm ispod gornjeg ruba pregradne palube na boku broda.
Pregradna paluba (eng. Bulkhead Deck) je najviša paluba do koje sežu poprečne vodonepropusne pregrade.
Najveća dopuštena duljina odjeljka, sa središtem u bilo kojoj točki duljine broda, dobiva se tako da se duljina naplavljivanja pomnoži s odgovarajućim faktorom, koji se naziva faktor pregrađivanja (eng. Factor of Subdivision). [7]

3 METODE ZA PRORAČUN STABILITETA BRODA U OŠTEĆENOM STANJU

Dvije glavne kategorije regulatornih koncepata i metodologija za procjenu stabilnosti brodova u oštećenom stanju danas su u upotrebi, a to su deterministička i vjerojatnosna (probabilistička) metoda, koje dovode do odgovarajućih regulatornih standarda preživljavanja.

Deterministički pristupi stabilnost broda u oštećenom stanju temelje se na propisanim, polu-empirijskim pravilima i kriterijima koji su izvedeni iz statističke analize povijesnih podataka oštećenja i praktičnog iskustva. Zbog polu-empirijskog načina izvođenja primjenjenih kriterija, ove metode ne mogu osigurati pouzdanu minimalnu potrebnu razinu preživljavanja u slučaju novog broda čiji dizajn odstupa od prošlosti niti ima poznatu razinu sigurnosti.

Vjerojatnosni pristup oštećenja stabilnosti oslanja se na racionalnoj statističkoj procjeni povijesnih slučajnih podataka i kombinira ove statističke podatke s polu empirijskim kriterijima za racionalniju procjenu preživljavanja broda upotrebom vjerojatnosnog koncepta koji uzima u obzir veliku količinu mogućih scenarija oštećenja s odgovarajućom težinom.

Probibalistička procjena omogućuje određivanje specifične razine brodskog preživaljavanja u slučaju prevratanja broda zbog poplava nastale oštećenjem od sudara kroz POSTIGNUTI INDEX PREGRAĐIVANJA (vjerojatnost preživljavanja sudara štete), dok deterministički standardi stabilnosti šteta ne odgovara na kvalificiranu razinu sigurnosti.

Determinističkom pristupu izrađuje se skupina slučajeva oštećenja (eng.: Damage cases), čiji broj, kao i broj odjeljaka uključenih u svaki od slučajeva, ovisi o dimenzijama broda i unutrašnjem rasporedu. Za svako stanje krcanja razmatra se svaki slučaj oštećenja. Vjerojatnosni pristup uzima vjerojatnost preživljavanja nakon sudara kao mjeru sigurnosti broda u oštećenom stanju (eng.: "attained subdivision index A"). Proračuni se vrše pri određenim gazovima i vrijednostima GM kako bi se dobila najmanja GM krivulja pri kojoj postignuti indeks pregrađivanja A udovoljava minimalnoj razini sigurnosti tj. zahtijevanom indeksu pregrađivanja R (eng.: "required subdivision index R").

3.1 VJEROJATNOSNA METODA

Zahtijevani index pregrađivanja *R* postavlja granicu sigurnosti stabiliteta u oštećenom stanju za brodove za prijevoz putnika, što znači da bi neki brod zadovoljio IMO standarde za sigurnost, njegov postignuti index pregrađivanja *A* mora biti veći od zahtijevanog *R*.

Zahtijevani index pregrađivanja po SOLAS-u glasi:

$$R = 1 - \frac{C_1}{L_s + C_2 \cdot N + C_3}$$

gdje *R* ovisi o duljini broda *Ls*, broju putnika *N* i kapacitetu brodova za spašavanje *N1*, C1=5000; C2=2,5; C3=15225. [6]

Postignuti index pregrađivanja A određuje se prema sljedećem izrazu:

$$A = \Sigma p_i s_i$$

gdje je

i predstavlja svaki odjeljak ili skupinu odjeljaka koje se razmatraju

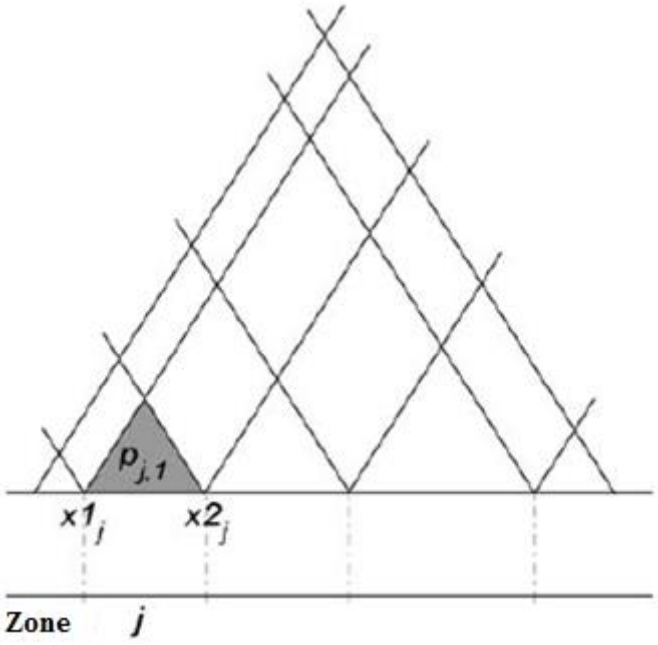
p_i parametar koji uzima u obzir vjerojatnost naplavljivanja jednog odjeljka, ili skupine susjednih odjeljaka, zanemarujući učinak bilo kojeg horizontalnog pregrađivanja

s_i parametar koji uzima u obzir vjerojatnost preživljavanja nakon naplavljivanja odjeljka ili skupine susjednih odjeljaka koji se razmatraju, uključujući učinak bilo kakvog horizontalnog pregrađivanja.

Parametar p_i za svaki odjeljak ili grupu odjeljaka se određuje na sljedeći način.

U slučaju oštećenja jedne zone:

$p_i = p(x_{1(j)}, x_{2(j)}) \cdot [r(x_{1(j)}, x_{2(j)}, b_k) - r(x_{1(j)}, x_{2(j)}, b_{k-1})]$



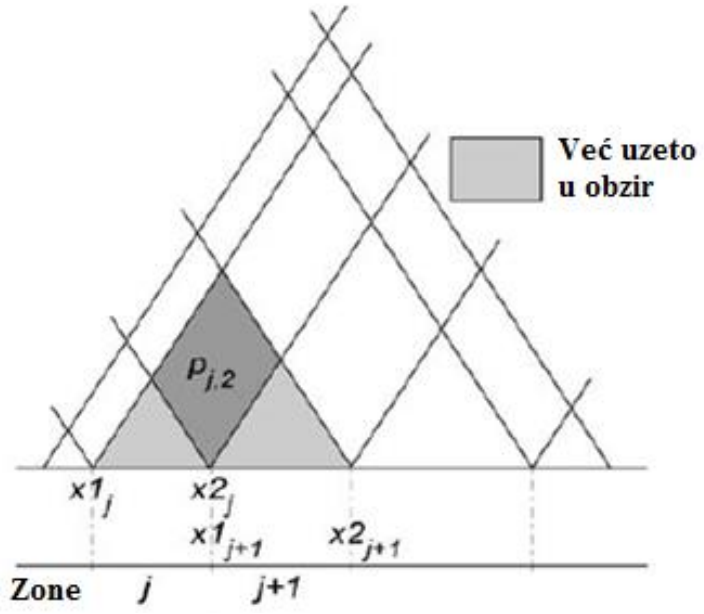
Slika 3. Oštećenje jedne zone [11]

U slučaju oštećenja dvije susjedne zone:

$$p_i = p(x_{1(j)}, x_{2(j+1)}) \cdot [r(x_{1(j)}, x_{2(j+1)}, b_k) - r(x_{1(j)}, x_{2(j+1)}, b_{k-1})] -$$

$$p(x_{1(j)}, x_{2(j)}) \cdot [r(x_{1(j)}, x_{2(j)}, b_k) - r(x_{1(j)}, x_{2(j)}, b_{k-1})] -$$

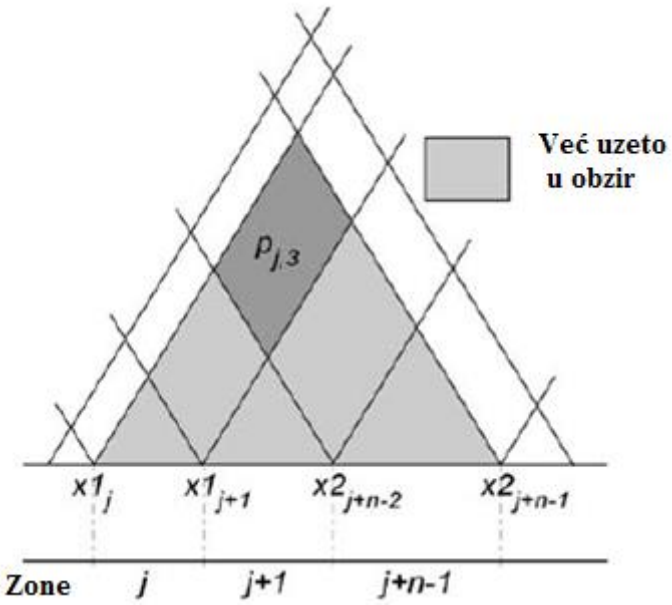
$$p(x_{1(j+1)}, x_{2(j+1)}) \cdot [r(x_{1(j+1)}, x_{2(j+1)}, b_k) - r(x_{1(j+1)}, x_{2(j+1)}, b_{k-1})]$$



Slika 4. Oštećenje dvije susjedne zone [11]

U slučaju oštećenja tri ili više susjednih zona:

$$p_i = p(x_{1(j)}, x_{2(j+n-1)}) \cdot [r(x_{1(j)}, x_{2(j+n-1)}, b_k) - r(x_{1(j)}, x_{2(j+n-1)}, b_{k-1})] -$$
$$p(x_{1(j)}, x_{2(j+n-2)}) \cdot [r(x_{1(j)}, x_{2(j+n-2)}, b_k) - r(x_{1(j)}, x_{2(j+n-2)}, b_{k-1})] -$$
$$p(x_{1(j+1)}, x_{2(j+n-1)}) \cdot [r(x_{1(j+1)}, x_{2(j+n-1)}, b_k) - r(x_{1(j+1)}, x_{2(j+n-1)}, b_{k-1})] -$$
$$p(x_{1(j+1)}, x_{2(j+n-2)}) \cdot [r(x_{1(j+1)}, x_{2(j+n-2)}, b_k) - r(x_{1(j+1)}, x_{2(j+n-2)}, b_{k-1})]$$



Slika 5. Oštećenje tri susjedne zone [11]

Pri čemu je:

$r(x_1, x_2, b_0) = 0$

j broj zone oštećenja najbliže krmi, ukoliko je zona najbliža pramcu prva

n broj susjednih oštećenih zona

k faktor uzdužnog pregrađivanja koje sprječava prodor u poprečnom pogledu. *k = 0* na boku broda

x_1 udaljenost od krmenog terminala pregradne duljine do točke zone oštećenja najbliže krmi

x_2 udaljenost od krmenog terminala pregradne duljine do točke zone oštećenja najbliže pramcu

b srednja poprečna udaljenost, u metrima, mjerena okomito na središnjicu, pri najdubljem pregradnom gazu između boka i pretpostavljene vertikalne ravnine. [9]

Faktori preživljavanja

Predloženi putnički propisi sastoje se od nekoliko sigurnosnih kriterija izvedbe, koji su usredotočeni na vrijednost faktora preživljavanja (*S*). Formula za *S* uzima u obzir hidrostatička svojstva nakon oštećenja koja su otkrivena putem istraživanja, ali i stvarnih iskustva i imaju najveći utjecaj na određivanje hoće li brod preživjeti oštećenje.

Ovi parametri su:

GZ_{max} Maksimalna pozitivna poluga stabiliteta, u metrima, do kuta θϖ. Ne smije se uzimati veća od 0.12 m.

Range Raspon pozitivnih poluga stabiliteta, u stupnjevima, mjerena od kuta θe. Pozitivan raspon se mjeri do θϖ. Raspon se ne uzima veći od 16°.

θϖ Kut pri kojem vrijednost poluge stabiliteta postaje negativna, ili kut pri kojem otvor koji se ne može učiniti nepropusnim na vremenske uvijete postane potopljen.

Θe Konačni kut nagiba broda u ravnotežnom stanju, u stupnjevima.

Parametri su kombinirani u formuli eksperimentalno izvedenoj iz modela testova kako bi zadali vrijednost S- faktora, između 0 i 1 do konačnog stanja.

$$S = K\left[\frac{GZ_{max}}{0{,}12} \cdot \frac{Range}{16}\right]^{\frac{1}{4}}$$

K= 1 ako je max θ e$\leqslant$ θ min.

K= 0 ako je θ e $\geqslant$ θ max.

U suprotnom slučaju:

$$K = \sqrt{\frac{\theta_{max} - \theta_e}{\theta_{max} - \theta_{min}}}$$

gdje je

Θmin = 7 stupnjeva za putničke, a 25 stupnjeva za teretne brodove,

Θmax= 15 stupnjeva za putničke, a 30 stupnjeva z a teretne brodove. [8]

U svim slučajevima S_i se treba uzeti kao nula gdje konačna vodna linija potapa:

- Donje rubove kritičnih točaka kroz koje je moguća progresivna naplava, a da nije prethodno uračunata u faktor S_i . Uključuje sve otvore koji su nepropusni na vremenske uvjete, a ne uključuje otvore koji su vodonepropusni.
- Uron bilo kakvog okomitog evakuacijskog okna na glavnoj palubi.
- Uron strojeva i kontrola za upravljanje vodonepropusnim vratima, ventilima, cijevima ili ventilacijskim vodovima, a da ti strojevi i kontrole nisu dostupni iznad glavne palube.
- Uron bilo kojeg dijela ventilacijskih vodova ili cjevovoda koji prolaze kroz vodonepropusne pregrade a da je uključen u zone oštećenja. Ukoliko nisu opremljeni mehanizmom za zatvaranje na svakoj pregradi.

Konačni indeks pregrađivanja A dobije se kao suma djelomičnih indeksa A_S, A_P i A_L koji su izračunati na gazovima d_S, d_P i d_L. Dodatno, zahtjeva se da niti jedan od djelomičnih indeksa pregrađivanja ne bude manji od 0,5R.

$$A = 0{,}4A_S + 0{,}4A_P + 0{,}2A_L$$

Gdje je

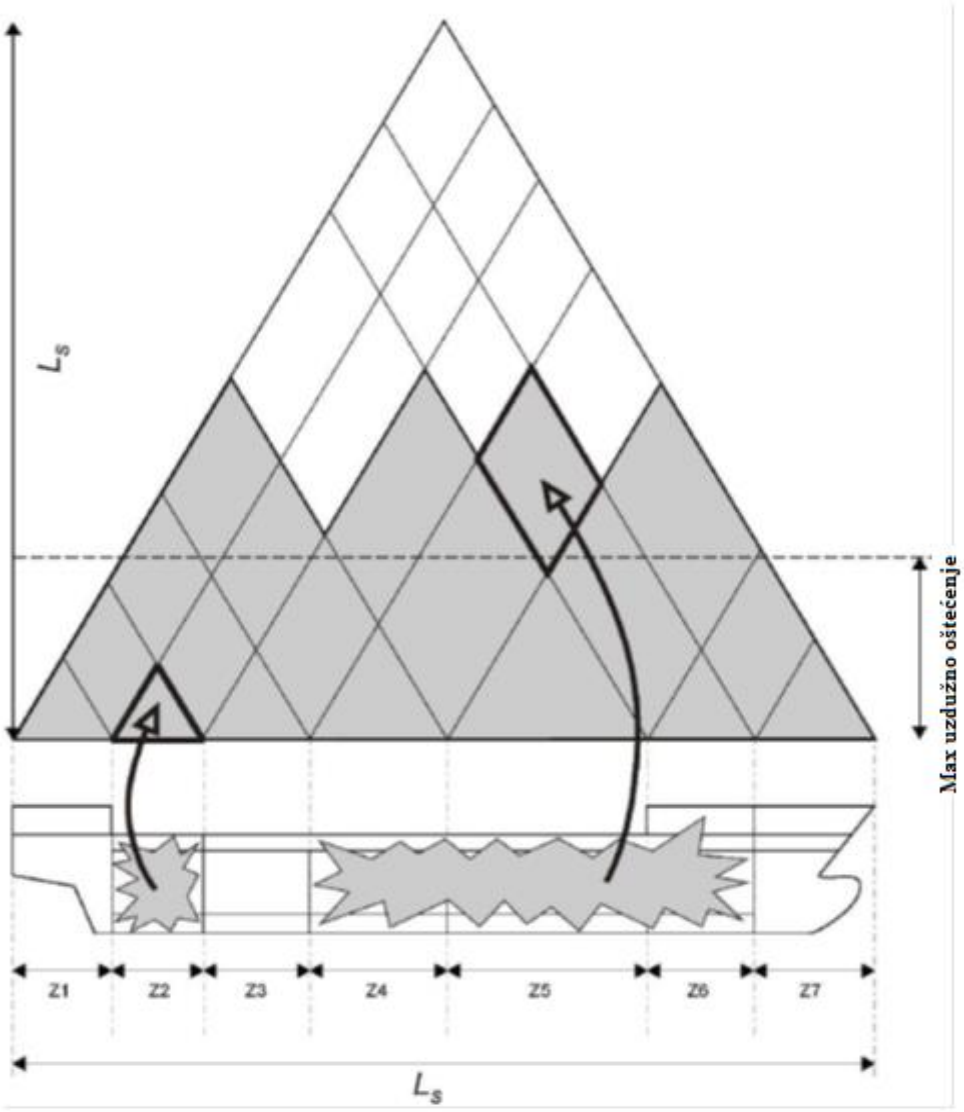
d_S najdublji pregradni gaz, vodna linija koja odgovara ljetnoj vodnoj liniji broda

d_L gaz pri lakoj eksploataciji, gaz u eksploataciji koji odgovara najmanjem predviđenom stanju krcanja sa uključenom dovoljnom količinom balasta za stabilitet i zagažaj

d_P djelomični pregradni gaz, iznosi 60% razlike između gaza pri lakoj eksploataciji i najdubljeg pregradnog gaza.

Kod određivanja vrijednosti A uzima se da brod plovi na ravnoj vodnoj liniji u slučajevima gazova d_S i d_P. U slučaju d_L gaza, uzima se trim u eksploataciji.[9] Vjerojatnost preživljavanja oštećenja određuje se formulom za ukupnu vjerojatnost kao zbroj umnožaka vjerojatnosti oštećenja za svaki odjeljak ili skupinu odjeljaka s vjerojatnosti preživljavanja oštećenja tog odjeljka ili skupine odjeljaka. Grafički to prikazujemo trokutom vjerojatnosti.

Osnovne karakteristike broda, početni gaz broda, koeficijent naplavljivosti prostora, vremenske prilike, metacentarska visina su samo neke od niza slučajnih veličina o kojima ovisi vjerojatnost da se brod neće prevrnuti ili potonuti kada se naplavi promatrani odjeljak.



Slika 6. Grafički prikaz teoretskog trokuta vjerojatnosti [11]

Međutim, nedovoljno precizno određena funkcija razdijobe vjerojatnosti s obzirom na trenutno dostupnu statistiku o oštećenjima (ova statistika u obzir uzima brodove koji su potonuli, a ne i ostale slučajeve kod kojih su brodovi bili lakše oštećeni), određivanja realnih koeficijenata naplavljivosi pojedinih prostora, realni kriterij za vjerojatnost preživljavanja oštećenja (neka oštećenja koja ispadaju kritična primjenom ove metode nisu kritična u stvarnosti za brod), samo su neki od nedostataka ove metode.

Vjerojatnosna metoda je ušla kao takva u nova harmonizirana pravila za proračun stabiliteta u oštećenom stanju zbog matematičkog modeliranja cijelog procesa te kao takva daje jednu prividnu sigurnost u dobivenim rezultatima s tim da treba biti oprezan s obzirom na gore navedene nedostatke uzimajući u obzir razne konfiguracije brodova i njihove veličine.

4 NAPLAVLJIVANJE BRODSKIH PROSTORA I PREGRAĐIVANJE PUTNIČKIH BRODOVA

4.1 NAPLAVLJIVANJE BRODSKIH PROSTORA

Pod naplavljivanjem brodskih odjela podrazumjeva se ulazak vode u neki brodski prostor, bez obzira na to puni li se vodom namjerno cjevovodom ili voda ulazi zbog nastalog prodora na brodskom trupu.

Kod prodora vode imamo tri slučaja:

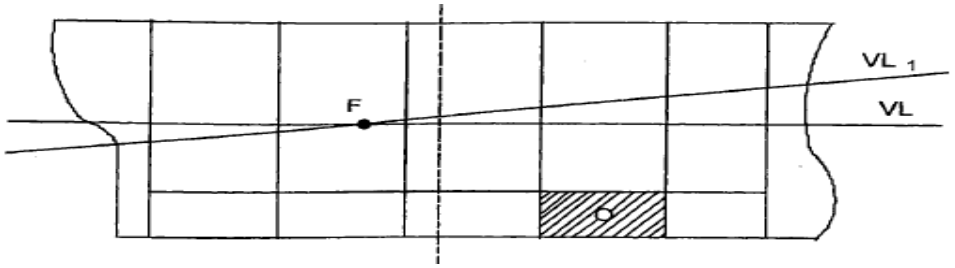
a) Naplavljeno odjeljenje je u spoju s vodom, a s gornje strane je ograđeno čvrstom palubom koja se nalazi ispod plovne vodne linije.
b) Naplavljeno odjeljenje nije u spoju s vodom niti je s gornje strane ograđeno čvrstom palubom.
c) Naplavljeno odjeljenje je u spoju s vodom, a s gornje strane nije ograđeno čvrstom palubom.

Prodor vode posljedica je nastalih oštećenja na vanjskoj oplati broda zbog nasukanja, sudara, dotrajalosti brodske konstrukcije ili njezina preopterećenja, dok u ratnim uvjetima takva oštećenja mogu nastati zbog udara različitih oružja, kao što su mine, bombe, rakete ili torpeda. Pri prodoru vode u brod može doći do osjetnog smanjenja stabilnosti, a u težim slučajevima i do potonuća broda. Zbog prodora vode koja je ušla u brod gubi dio istisnine broda, jer je voda koja je ušla u neki brodski prostor ostaje u vezi s vanjskom vodom u kojoj brod plovi. Izgubljena istisnina mora se nadoknaditi većim uronjavanjem broda, tako da novi uronjeni volumen neoštećenog dijela broda bude jednak prijašnjem volumenu podvodnog dijela broda prije nastalog prodora vode. Težine se, dakle, na brodu nisu promjenile, pa prema tome ni uzgon. Ako se s povećanim utonućem ili odgovarajućim trimom broda može nadoknaditi izgubljena istisnina tj. nova dodatna masa vode koja je prodrla u brod, brod će i nadalje ploviti u novom položaju. Ako je prodor vode bio toliki da ga rezervna istisnina ne može kompezirati, brod će potonuti. Radi lokaliziranja prodora vode, da bi se on ograničio samo na prostor između dviju susjednh pregrada, čitava je unutrašnjost broda podjeljena sistemom poprečnih, a ponekad i uzdužnih pregrada u više vodonepropusnih prostora (odjeljenja) broda.

Napomenimo da nova vodena linija koju treba izračunati za slučaj prodora vode u bilo koji prostor broda, ne smije prelaziti preko tzv. pregradne palube, tj. do one palube do koje dopiru vodonepropusne pregrade. Isto tako kutovi nagiba broda pri nesimetričnom prodoru ne smiju biti toliki da pod vodu dođu otvori koji se ne mogu nepropusno zatvoriti. Nadalje, stabilnost broda mora biti tolika da se brod ne prevrne zbog djelovanja vjetra i valova.

4.1.1 Prvi slučaj: prostor ima vodonepropusni krov, a voda ispunjava cijeli taj prostor

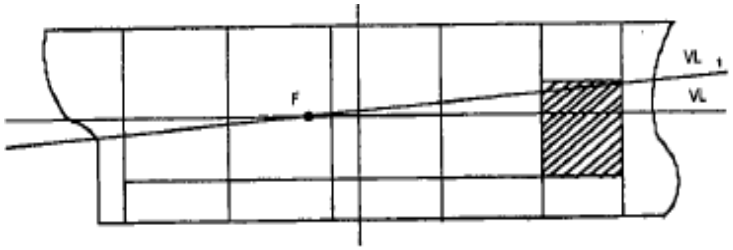
To se događa pri naplavljivanju tankova (ćelija) dvodna, balastnih tankova ili bilo kojeg prostora pod glavnom palubom. U tim slučajevima svejedno je je li poplava nastala zbog prodora ili je prostor namjerno napunjen vodom pomoću cjevovoda i ventila na dnu prostora koji se nakon naplavljivanja zatvore. U svakom slučaju naplavljeni prostor je sada pun do vrha i nema spoja s vanjskom vodom, jer su ventili za naplavljivanje zatvoreni, odnosno zatvorena je rupa kroz koju je naplavljivala voda u brod. U ovim slučajevima voda se ne može premještati i treba je smatrati kao tvrdi teret mase $\boldsymbol{p = v * \varrho}$ kojega se težište nalazi u središtu volumena $(\boldsymbol{v})$ prostora. [1]



Slika 7. Naplavljeno odjeljenje u spoju s vodom, ograđeno s gorne strane čvrstom palubom [2]

4.1.2 Drugi slučaj: prostor je s gornje strane otvoren ili je napunjen vodom djelomično, a nema spoja s vanjskom vodom

U ovom slučaju voda u prostoru može se slobodno premještati, zbog toga se javlja slobodna površina koja smanjuje početnu stabilnost broda. Moment tromosti slobodne težine, s obzirom na veliku površinu prostora bez pregrade, jako će djelovati na gubitak metacentarske visine, bez obzira na koliko se sustavno težište broda pomaknulo prema dolje, s obzirom na ukrcanu težinu vode.



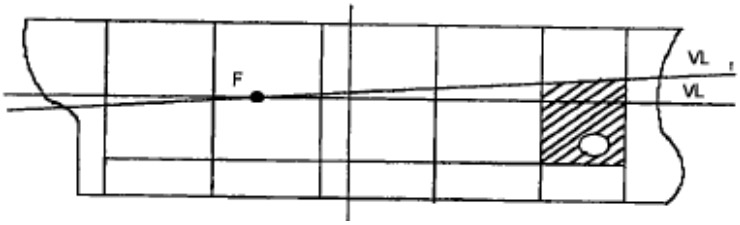
Slika 8. Naplavljeno odjeljenje nije u spoju s vodom niti je s gornje strane ograđeno čvrstom palubm [2]

Svi proračuni promjene gaza broda, sustavnog težišta i eventualnog nagiba broda te gubitak rezervnog uzgona, isti su kao u prethodnom slučaju. Poteškoću će predstavljati proračun momenta tromosti slobodne površine. S obzirom na uzdužnu i poprečnu os nagibanja broda, javit će se utjecaj slobodnih površina na uzdužnu i poprečnu metacentarsku visinu. Zbog toga što je uzdužna metacentarska visina dovoljno velika, njezino smanjenje, s obzirom na uzdužni moment tromosti slobodne površine, u praksi je zanemarivo. Poprečni moment tromosti slobodne površineje bitan i može se izračunati prema poznatim izrazima, jer je poprečna metacentarska visina glavno mjerilo stabilnosti broda.

4.1.3 Treći slučaj: prostor zbog prodora vode ili otvorenog ventila ima stalan spoj s vanjskom vodom i može se slobodno širiti u visnu

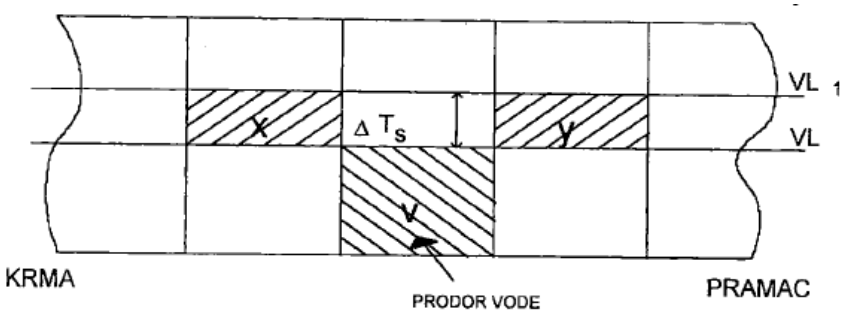
Najteži je slučaj, zbog toga što brod gubi rezervni uzgon koji je činilo odjeljenje gdje je došlo do prodora vode. Prodorom vode koji je nastao ispod vodene linije dolazi do toga da će voda prodirati u skladište sve dok se zakonom o spojenim posudama ne izjednači nivo vode u skladištu s novonastalom vodnom linijom. Nova vodena linija tj. novi deplasman

broda, povećao se za odgovarajuću težinu nadošle vode. Nastaje smanjenje poprečne stabilnosti zbog smanjenja površine plovne vodne linije kao i zbog utjecaja momenta tromosti slobodne površine u naplavljenim prostorima.



Slika 9. Naplavljeno odjeljenje je u spoju s vodom a s gornje strane nije ograđeno čvrstom palubom [2]

Gaz se povećao i brod pluta na novoj vodenoj liniji $\mathbf{VL_1}$ s novim deplasmanom u koji je uključena težina prodrle vode. Volumen v predstavlja količinu izgubljenog uzgona zbog prodora vode. Gubitak rezervnog uzgona iznad VL do volumena (**X+Y**), a volumen (**X+Y**) predstavlja umnožak neoštećenog dijela površine vodene linije i debljine sloja $\boldsymbol{\Delta T_S}$. Debljina sloja $\boldsymbol{\Delta T_S}$ predstavlja povećanje gaza zbog prodora vode (paralelno uronuće). Iz toga se dobije da je volumen (**X+Y**) = volumen v . [2]



Slika 10. Gubitak uzgona kod prodora [2]

4.2 PREGRAĐIVANJE PUTNIČKIH BRODOVA

Pregrađivanje je u najtješnijoj vezi s naplavljivanjem broda, a svrha mu je da se brodski prostor podjeli nepropusnim stijenama u vodonepropusne prostore ili ćelije. Time se postiže da u slučaju oštećenja vanjske oplate u brod uđe ograničena količina vode, a brod i dalje zadržava sposobnost plovljenja.

Pregrade daju brodu potrebnu poprečnu i uzdužnu čvrstoću pri naprezanju na valovima, pri dokovanju i pri naprezanjima unutrašnjosti broda. Stoga se vodonepropusne pregrade još pojačavaju (ukrepljuju) okomitim, a katkad i vodoravnim ukrepama. Pregrade se spajaju s oplatom broda zavarivanjem. Poprečne i uzdužne pregrade omogućuju da se na brodu dobiju razni tankovi, na primjer, tankovi za gorivo, balast, pitku vodu, biljna ulja i dr.

Pri određivanju broja vodonepropusnih pregrada na trgovačkim brodovima treba zadovoljiti tri važna uvjeta:

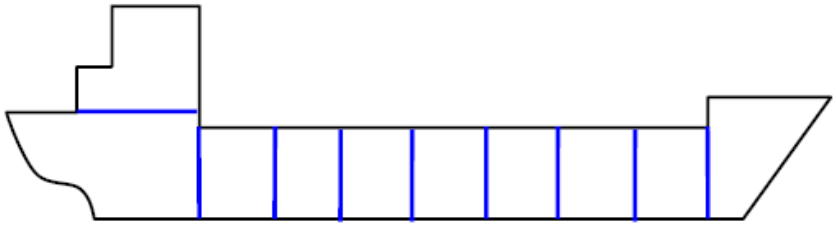
a) ekonomsku iskoristivost brodskog prostora
b) čvrstoću brodskog trupa
c) održavanje sposobnosti plovljenja.

Opća pravila o sigurnosti brodova dopuštaju da brod može uroniti do pregradne palube (paluba do koje pregrade dopiru u visinu) ako mu je naplavljen jedan, dva ili tri bilo koja susjedna odjeljka. Svakom gazu broda odgovara jedna pregradna krivulja. Stoga se ta krivulja konstruira tako da se duljina broda podjeli u 20 dijelova i za svaki takav dio izračuna masa tereta koji bi, kad bi bio ukrcan, uronio do pregradne palube.

Ta se masa zatim pretvara u volumen vode čije se središte nalazi u određenoj točki, a visina te točke uzima se za ordinatu krivulje. Kad se te točke spoje dobije se **pregradna krivulja** koja odgovara određenom gazu broda. Pomoću krivulje pregrada može se odrediti položaj pregrada pri projektiranju broda, odnosno može se kontrolirati njihov razmještaj na već sagrađenim brodovima.

Prema SOLAS konvenciji o pregrađivanju trgovačkih brodova, pregradna teretna linija je vodena linija prema kojoj je određena podjela broda na pregrade, a pregradna paluba najviša paluba do koje dopiru poprečne vodonepropusne pregrade, dok je naplavljivost jednog prostora (odjela) izražena postotkom volumena tog prostora koji voda može ispuniti.
Za svako mjesto broda duljina koja može biti naplavljena treba biti određena takvom računskom metodom koja uzima u oblik gaz i ostale karakteristike broda.

Stupanj pregrađivanja mijenja se prema duljini i namjeni broda, a najpotpunije pregrađivanje imaju najveći brodovi namjenjeni prijevozu putnika. Najveća dopuštena duljina odjeljka, kojega je središte na bilo kojem mjestu brodske duljine, dobije se ako se duljina koja može biti naplavljena pomnoži sa jednim brojem koji se zove pregradni faktor.(engl. factor of subdivision). Vrlo je važna odredba Konvencije u kojoj je naglašeno da brod mora biti sposoban izdržati potpuno naplavljivanje bilo kojeg odjela koji je u granicama propisane naplavljive duljine. [1]

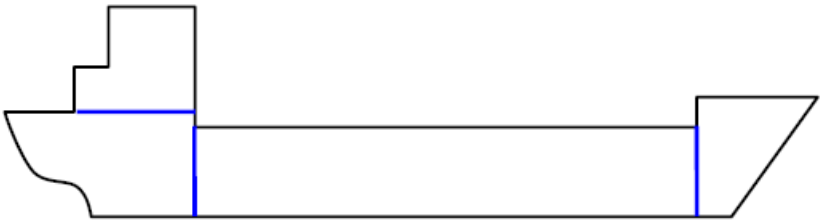


Slika 11. Dodatne poprečne pregrade[10]

Kako bi se osiguralo dostatno preživljavanje brodova koji se sudare u bok, područje između navedenih pregrada podijeljeno je na vodonepropusne odjeljke. Očekuje se da će putnički brodovi podnijeti oštećenje nultog, 1 ili 2 takvog odjeljka, ovisno o njihovoj veličini i drugim čimbenicima, tako da se brodovi nazivaju sa nultim, jednim ili dvama odjeljnjima.

Svaki trgovački brod mora imati **pramčanu sudarnu pregradu** koja mora biti nepropusna sve do pregradne palube. Ta se pregrada ne smije postaviti na udaljenosti manjoj od 5% duljine broda, mjereno od pramčane okomice, ni većoj od 5% duljine broda više 3 metra.

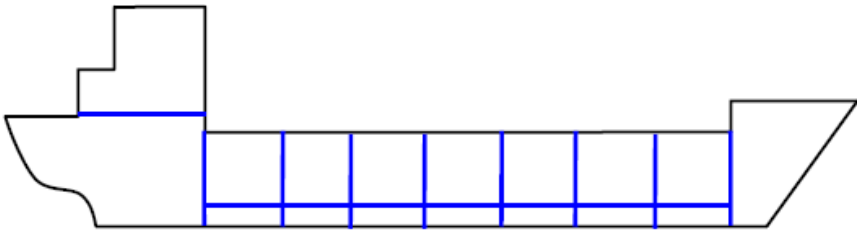
Da bi se osiguralo dovoljno preživljavanja za brodove koji se sudaraju po pramcu, brodovi moraju imati sudarnu pregradu koji se nalazi dovoljno daleko iza pramčane statve kako bi se osiguralo da voda ne prodire u glavni dio uronjenog broda. Očekuje se da će svi brodovi preživjeti potpuno oštećenje ispred te pregrade. Slična je i prednja pregrada strojarnice smještena ispred strojarnice u slučaju sudara po krmi. Nadalje, uzdignute palube na svakom kraju broda su veće od srednjeg dijela broda, a ti volumeni, pramac i krma predstavljaju rezervni uzgon koji je od velike važnosti u vrijeme opasnosti. [10]



Slika 12. Pramčana sudarna pregrada i pregrada strojarnice [10]

Kako bi se osigurala preživljavanje broda uslijed oštećenja od nasukavanja koristi se **dvodno.** Konvencija ima i odredbe o **dvodnu** jer je ono također važno za sigurnost broda. Dvodno daje sigurnost brodu kad se nasuče ili udari o dno, a osim toga služi za krcanje balasta i smještaj goriva. Po odredbama Konvencije dvodno se, načelno, mora protezati od pramčane sudarne pregrade do pregrade krmenoga pika, te se mora protezati prema bokovima broda tako da zaštićuje dno broda i uzvoje dna. [10]

Općenito se očekuje da će putnički brodovi izdržati oštećenje usljed nasukanja, dok teretni brodovi neće. Mnogi teretni brodovi, međutim, imaju dvostruko dno iz drugih razloga, tako da imaju izvrsnu mogućnost za preživljavanje u slučaju oštećenja usljed nasukanja.



Slika 13. Pregrade dvodna [10]

4.3 VRSTE I POLOŽAJ VODONEPROPUSNIH VRATA

Nepropusnost je primarni cilj da bi se održala vodonepropusna pregrada. Kod većine brodova postoje neizbježne situacije gdje je pristup iz jednog odjeljka u drugi nužan, npr. pristup tunelu osovine. Ova je potreba riješena upotrebom vodonepropusnih vrata. Pregradna ploča obično je izrezana u pravokutni oblik koji služi za vodonepropusna vrata. Dimenzije otvora su minimalne. Da bi se održala razinu naprezanja ispod sigurnosnih granica, otvor se ojača dvostrukim pločama kako bi se povećala debljina ploče pregrade oko otvora. Vodonepropusna vrata obično su hidraulički ili električki upravljiva i horizontalno ili vertikalno klizna. Razlog zašto se ljuljajuća vrata ne koriste u vodonepropusnim pregradama je zato što bi bilo nemoguće zatvoriti takva vrata u slučaju poplave.

Upravljanje mora biti lagano čak i kada je brod nagnut 15 stupnjeva na jednu i drugu stranu, a upravljački sustav treba biti tako dizajniran da se vratima može upravljati iz blizine i daljinski, tj. s mjesta iznad pregradne palube. Na svim brodovima nalaze se vizualni pokazivači na mjestu daljinskog upravljača kako bi označili je su li vrata otvorena ili zatvorena. [12]

Vodonepropusna vrata podvrgavaju se ispitivanju tlaka nakon ugradnje kako bi provjerili njihovu strukturnu cjelovitost dizajna pri hidrostatskom tlaku u slučaju potpune poplave do pregradne palube. Ispod najdublje vodne linije, vrata trebaju biti klizna, samo izuzetno se odobravaju i ovješena vrata.

Nepropusna vrata moraju biti dovoljno čvrsta i odgovarajuće izvedbe. Otvori za nepropusna vrata moraju biti odgovarajuće ukrepljena.

Klizna vrata (eng. sliding doors) se moraju pomno postaviti da su ispravno vođena u svim položajima. Mehanizam za zatvaranje se mora pouzdano rukovati s obje strane pregrade i sa palube nadvođa. Ukoliko se zatvorenost vrata ne može utvrditi neposrednim opažanjem, mora se ugraditi indikator na mjestu odakle se rukuje vratima.



Slika 14. Klizna nepropusna vrata [3]

Ovješena vrata (eng. hinged doors) moraju imati odgovarajuće brtve koje osiguravaju potpunu nepropusnost. Šarniri trebaju biti od materijala otpornih na koroziju. Vrata se moraju moći otvarati i zatvarati s obje strane pregrade. Mora se vidno istaknuti upozorenje da se vrata moraju zatvoriti za vrijeme boravka broda na moru.



Slika 15. Ovješena nepropusna vrata [3]

Dizajn održava nepropusna vrata zatvorenim, i svi proračuni stabiliteta u oštećenom stanju baziraju se na zatvorenim nepropusnim vratima. Operativne potrebe se ne razmatraju tijekom dizajna tako da je izgled plovila u sukobu s operativnim potrebama, pa tako mnogi brodovi imaju iznimku za otvaranje nepropusnih vrata tijekom navigacije.

5 PRIMJER NESREĆE COSTA CONCORDIE

5.1 OPĆENITO O COSTA CONCORDIE I NESREĆI [3]

Costa Concordia je bio prvi brod Concordia klase izgrađen u Italiji 2006. godine, nakon čega su slijedili slični brodovi Costa Serena, Costa Pacifica, Costa Favolosa i Costa Fascinosa te Carnival Splendor izgrađeni za Carnival Cruise Lines. Kada su Concordia i njezini sestrinski brodovi veličine 114,147 bruto tona stupili u službu, bili su među najvećim brodovima izgrađenim u Italiji.



Slika 16. Costa Concordia nakon nesreće [13]

Costa Concordia bila je duljine 247,37 metara (290,20 metara preko svega), širine 35,5 metara, visine 11,2 metra i gaza 14,18 metara. Imala je 13 paluba i bila je pogonjena s dva elektromotora snage 21 megavat spojenih s fiksnim propelerima. Nezina putna brzina bila je 19,6 čvorova, a maksimalna 23 čvora. Kapacitet broda bio je 3780 putnika i 1100 članova posade, a u trenutku nesreće na brodu se nalazilo 4229 osoba, uključujući 3206 putnika, od čega:

- **2954 odraslih**
- **200 djece (do 12 godina)**
- **52 bebe (do 3 godine)**
- **1023 članova posade.**

Ruta broda bila je na području zapadnog mediterana, gdje je plovio od 2006. do 2012. godine.



Slika 17. Ruta broda [3]

Dana 13. siječnja 2012., dok je Costa Concordia bila u plovidbi u Sredozemnom moru (Tirensko more, talijanska obala) s 4229 osoba na brodu (3206 putnika i 1023 članova posade), u povoljnim meteorološkim uvjetima, u 21 45 07 LT (po lokalnom vremenu) brod se iznenada sudario sa stijenom na otoku Giglio. Brod je napustio luku Civitavecchia i potom se uputio u Savonu (Italija).

Brod je plovio preblizu obale, u slabo osvijetljenom obalnom području, pod zapovjedništvom zapovjednika koji je planirao proći pri nesigurnoj udaljenosti u noćnim satima i pri velikoj brzini (15,5 čvorova). Opasnost je prekasno shvaćena pa je pokušaj izbjegavanja nasukanja bio beskoristan, a svi koji su bili na brodu shvatili su da se događa nešto vrlo ozbiljno, jer se brod silovito zatresao i brzina se odmah smanjila.

Brod je odmah izgubio pogon što je prouzrokovalo totalni „black-out“ (gubitak struje). Generator u nuždi uključio se kako se i očekivalo i brod se okrenuo na desno, te nakon toga se

nasukao, zbog povoljnog vjetra i struje, na otoku Giglio oko 23 sata i ozbiljno se nagnuo na desni bok, s nagibom oko 15 °.

U nesreći su stradale 32 osobe od čega 27 putnika i 5 članova posade, od kojih je dvoje pronađeno tek nakon vađenja olupine.

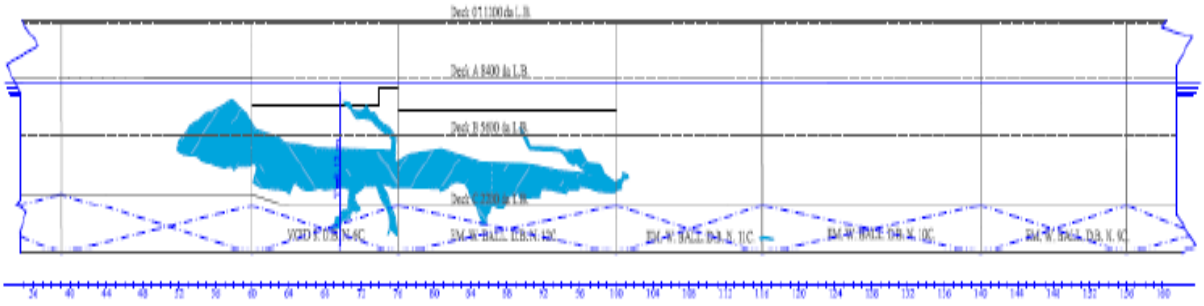


Slika 18. Zaglavljena stijena u oštećenom području [3]

Usljed nasukanja Costa Concordia pretrpjela je oštećenje na lijevoj strani broda ukupne duljine 52,94 metra između rebra broj 52 i rebra broj 124 koji uključuju vodonepropusne odjeljke 4, 5, 6 i 7 koji su poplavljeni, te su također poplavljeni i dvodna odjeljaka 5, 6 i 7.
Ta oštećenja uzrokuju poplave na četiri susjedna odjeljka čija je širina oštećenja znatno veća od onog propisanih odgovarajućim propisima u vezi s pregrađivanjem i provjerom stabilnosti u poplavama (dva susjedna poplavljena odjeljka) koji iznose 10,710 m.
Oštećenje koje je nastalo nalazilo se daleko iznad palube dvodna i to je bilo presudno u pogledu ozbiljnosti nesreće.

U trenutku nesreće, na oštećenom području, sva su vodonepropusna vrata bila zatvorena, te se na taj način spriječilo još brže naplavljivanje vode u brod.

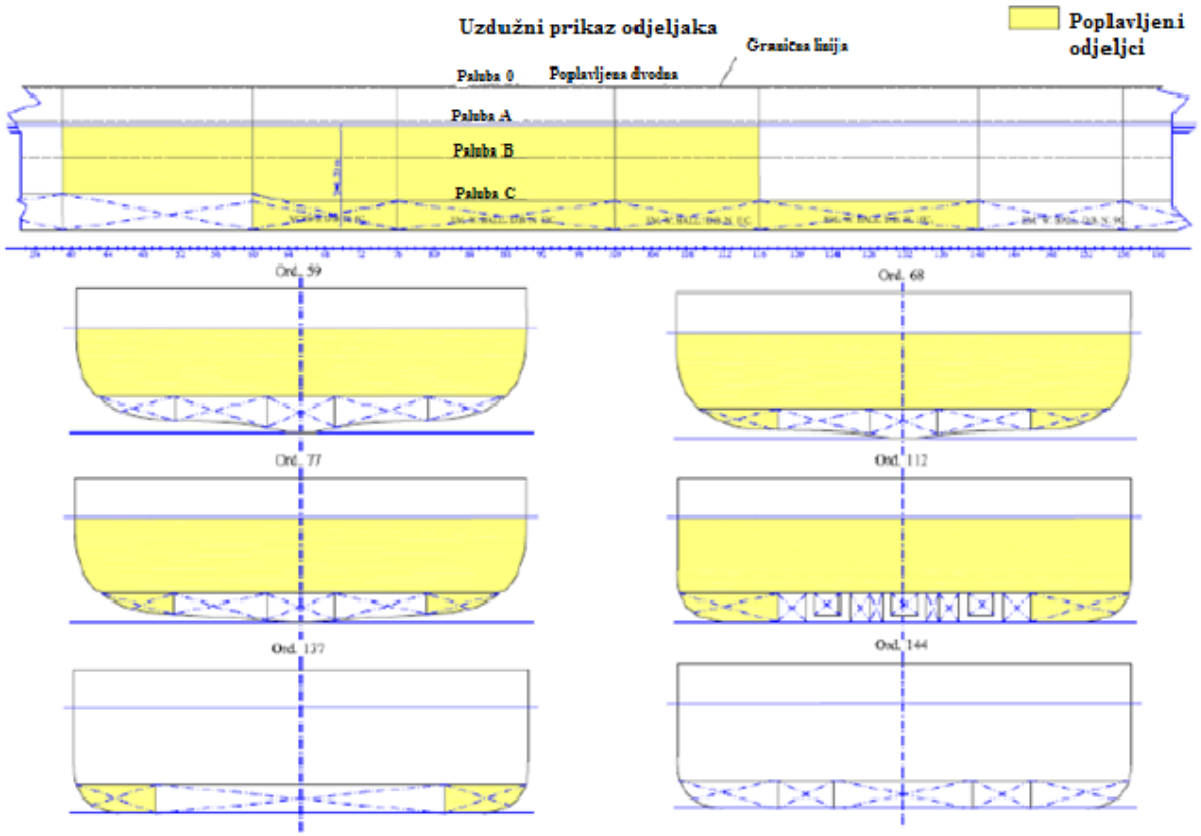
Opseg oštećenja koje je nastalo pri sudaru vidljivo je iz sljedeće slike.



Slika 19. Opseg oštećenja [3]

Samo nekoliko minuta nakon nesreće vodonepropusni odjeljci broj 5 i 6 bili su poplavljeni, a susjedni odjeljci broj 4 i 7 u početku su bili djelomično popunjeni te se u njima stvarale velike slobodne površine koje su dodatno utjecale na stabilnost broda, da bi nakon otprilike 40 minuta od kontakta i oni bili ispunjeni vodom.

Ovdje je moguće vidjeti poplavljene odjeljke s njihovim odgovarajućim širenjem s jedne na drugu stranu (središnji odjeljci dvodna nisu bili uključeni u poplave).



Slika 20. Uzdužni i poprečni prikaz naplavljenih područja [3]

Na prikazanoj slici žuti dijelovi predstavljaju odjeljke i bočne djelove dvodna koji su potopljeni nedugo nakon udara, kako na uzdužnom planu broda tako i na značajnim poprečnim presjecima.

5.2 SIMULACIJA NAPLAVLJIVANJA [3]

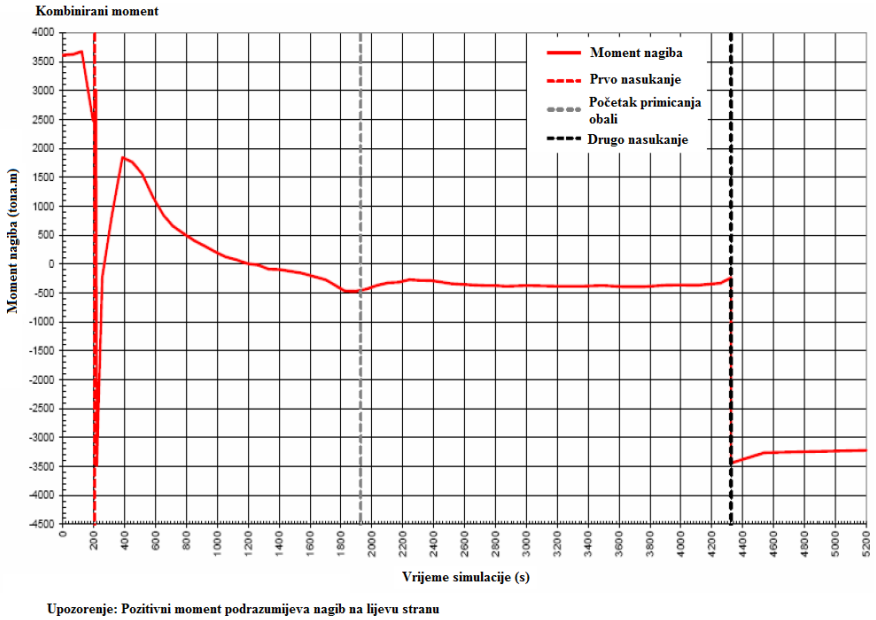
Simulaciju naplavljivanja Costa Concordie izradio je Ured za Sigurnost na moru iz Glasgow-a u cilju daljnjeg razumijevanja ponašanja broda u odnosu na dinamiku naplavljivanja.
Simulacije su provedene uz pomoć složenih programa koji su sposobni za modeliranje dinamike nesreće s obzirom na vanjske utjecaje poput valova i vanjskih sila i momenata kroz vrijeme. Simulacije poplave razvijene su s informacijama iz različitih izvora, tj. izjava svjedoka, izvješća istraživanja i podataka snimljenih VDR-om.

Prostori koji su naplavljeni su prikazani u tablici ispod.

Tablica 2. Naplavljeni prostori [3]

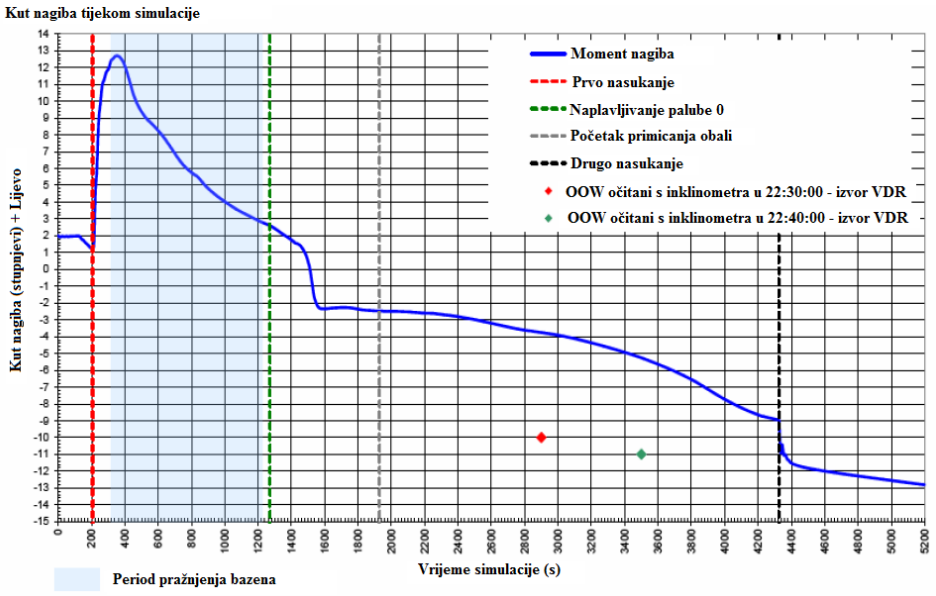
Prostor	Uzdužno protezanje prostora (rebro #)	Vertikalno protezanje prostora (paluba)
Soba za komprimiranje	Rebro #44 - #66	Paluba C – Palube B
Pogonska električna strojarnica	Rebro #44 - #66	Osnovna linija – Paluba 0
Stražnja strojarnica	Rebro #76 - #100	Osnovna linija – Paluba 0
Prednja strojarnica	Rebro #100 - #126	Osnovna linija – Paluba 0
Dvodno	Rebro #116 - #140	Osnovna linija – Paluba C

Primjenjivi momenti zanošenja su zbog vjetra (NE 18 čvorova), okretanja, konačnog nasukanja i težine stijene koja je zapela u trup (97 t). Dijagram kombiniranog momenta poslije udara u stijenu prikazano je na slici 21.

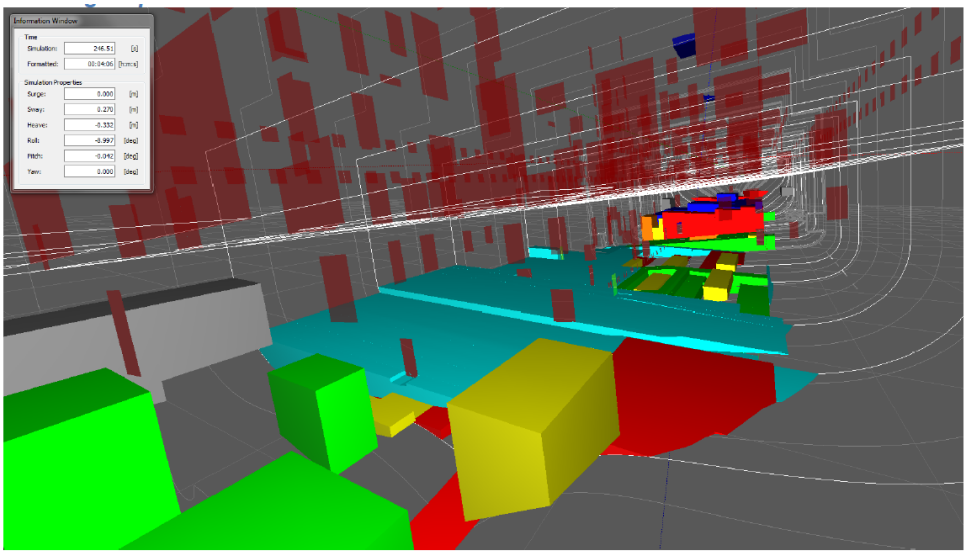


Slika 21. Moment nagiba [3]

Na grafu koji se nalazi na slici 22. prikazan je kut nagiba broda. Pretpostavlja se da se brod prvo nagnuo na lijevu stranu, stranu na kojoj je nastala rupa na oplati tijekom nasukanja, zbog ogromnog ulaska vode te je uzrokovala otvaranje poprečnog poplavnog otvora (u odjeljku broj 6 između rebra broj 84 i 96) koji dopušta simetrično širenje poplave koje dovodi do ispravljanja broda. Kad je lijeva strana bila izložena vjetru, vjerojatno i zbog putnika koji su se okupili na desnoj strani i zbog čamaca za spašavanje na istoj strani, brod je započeo naginjanje na desnu stranu. Nakon što se brod drugi put nasukao, ovog puta na desnu stranu, dolazi do potpunog gubitka stabiliteta i povećava se nagib na desnu stranu.

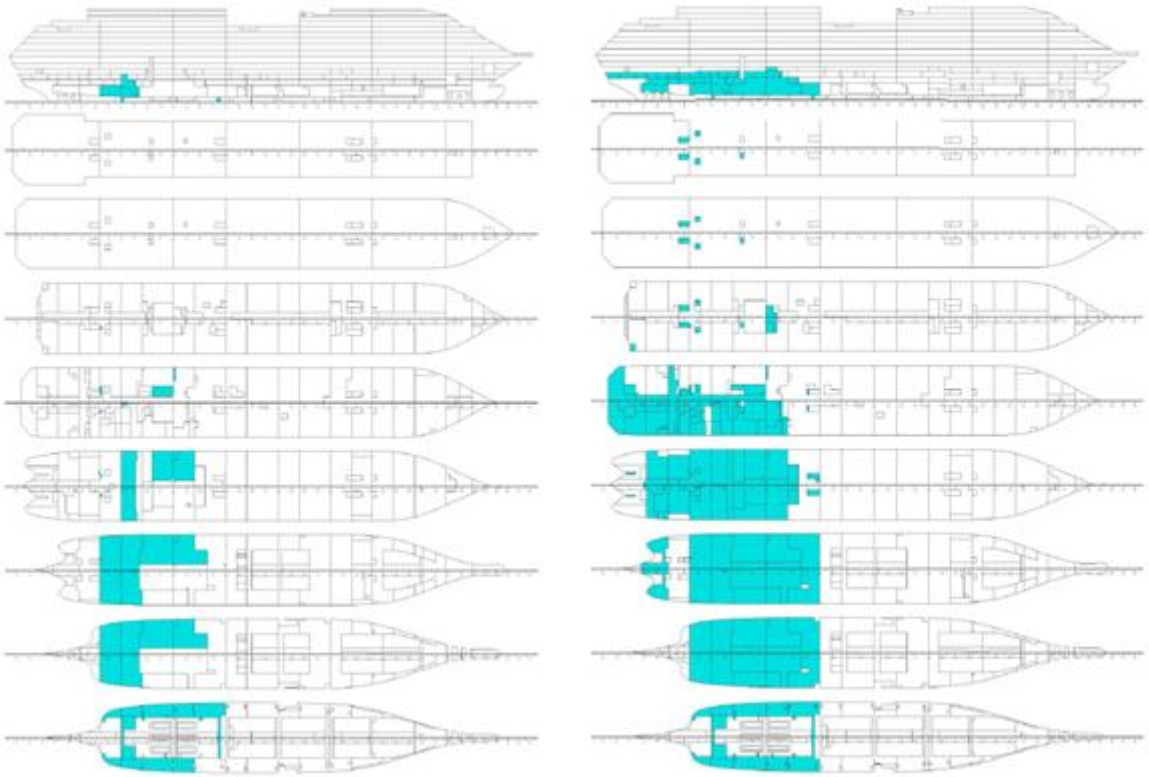


Slika 22. Kut nagiba [3]



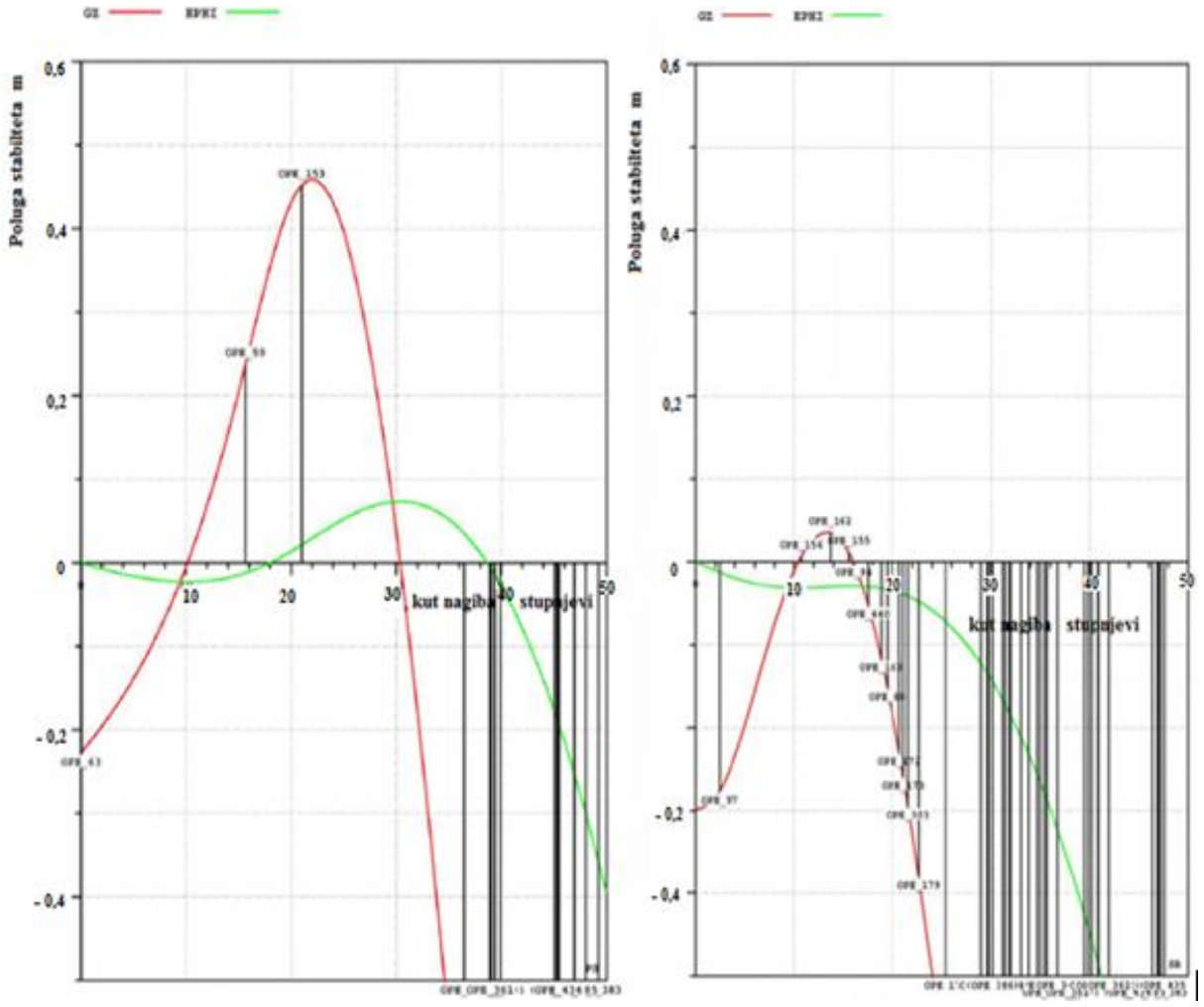
Slika 23. Situacija 1 [3]

Na slici 23. prikazan je 3D model naplavljivanja brodskih prostora u Situaciji 1, što predstavlja stanje plovila od 21:45 sati, odnosno situaciju odmah nakon nesreće. U tom trenutku nagib broda je na lijevu stranu, i razina vode je veća na toj strani.



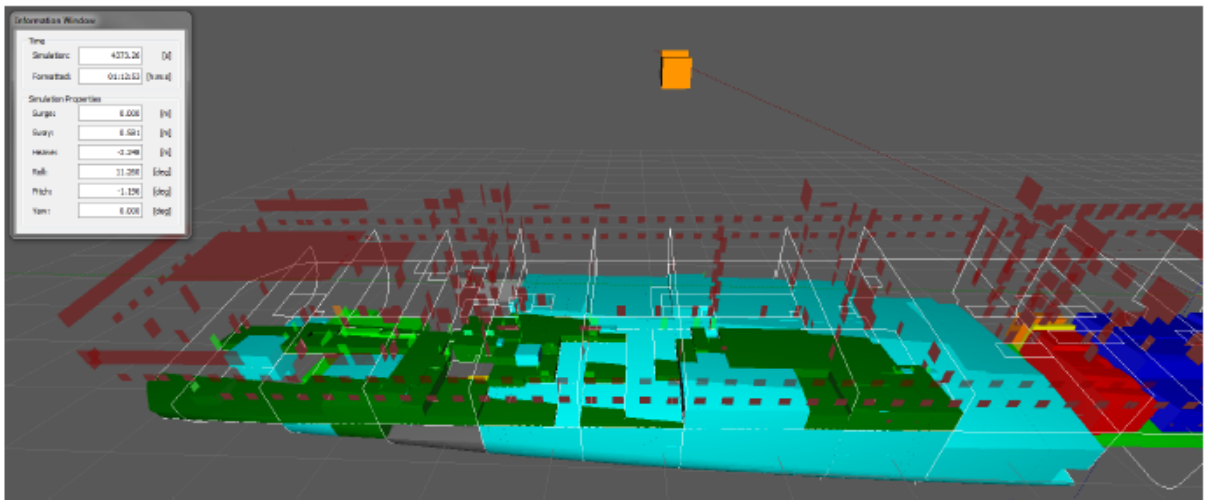
Slika 24. Opseg poplava za situaciju 1 i situaciju 10 [3]

Na slici 24. jasno se vidi razlika u naplavljenim područjima za situaciju 1 i situaciju 10. Vidljivo je da je u situaciji 1 količina naplavljene vode veća na lijevoj strani, dok je kod situacije 10 veća količina naplavljenja na desnoj strani, te se zbog toga nagib broda na desnu stranu povećavao. Isto tako jasno se vidi da je broj naplavljenih paluba u stanju broj 10 puno veći te je poplavljena i pregradna paluba (Paluba broj 1) na krmi što omogućuje 12 dodatnih otvora za ulazak vode, a u kasnijem stadiju naplavljivanja dodatna 22 otvora.



Slika 25. GZ krivulja uz pretpostavku da nema progresivnog naplavljivanja za situaciju 1 i situaciju 10 [3]

Na slici 25. prikazana su dva grafa; prvi se odnosi na situaciju 1, a drugi na situaciju 10. Stabilnost plovila je zadovoljavajuća u smislu GM na ravnotežu kuta nagiba, rasponu i površini ispod krivulje poluge ispravljanja, koja predstavlja zaostalu energiju ispravljanja broda, od situacije 1 (što predstavlja stanje plovila u 21:45 sati od 13. siječnja 2012.) do situacije 9 (što predstavlja stanje plovila u 22:31 sati), dok je u stanju 10 (što predstavlja stanje plovila u 22:54 sati) područje ispod krivulje poluge ispravljanja gotovo zanemarivo, što znači da je plovilo izgubilo sposobnost otpora uzroku nagiba.



Slika 26. Situacija 10 [3]

U situaciji 10 brod je imao kontakt s podvodnim stijenama i na njega djeluje moment usporavanja inercije broda nastale zbog djelovanja vjetra i struja. Kut nagiba u tom trenutku iznosio je oko 18 stupnjeva na desnu stranu broda i jasno se može vidjeti količina vode od naplavljivanja na pregradnoj palubi. U tom trenutku dolazi do manjeg naplavljivanja Palube 1 i krmene palube za privez, i ne događaju se nikakva daljnja progresivna naplavljivanja duž pregradbene palube na rebru # 116 zbog zatvorenih ovješenih vodonepropusnih vrata na desnoj strani, i normalna vrata koja se spajaju na taj prednji prostor nalaze se u središnjoj liniji i nisu u kontaktu s vodom koja je nastala uslijed naplavljivanja.



Slika 27. Nasukanje broda drugi put [3]

Nakon što se brod nasukao drugi put sa desnom stranom može se pretpostaviti da je došlo do potpunog gubitka stabiliteta, te je na kraju brod cijelom tom stranom se oslonio na pod i ostao u tom položaju. Oko 24 sata kut nagiba broda ozbiljno se povećao i dostigao je vrijednost 40 stupnjeve, da bi do kraja akcije spašavanja dostigao vrijednost od čak 80 stupnjeva.

6 ZAKLJUČAK

Danas se javlja sve veća potreba za putničkim brodovima čija uloga više nije samo prevoziti putnike od točke A do točke B, nego su to „plutajući hoteli“ namjenjeni turističkim svrhama. Trend je izgradnje sve većih putničkih brodova čiji kapacitet danas doseže gotovo 8000 osoba, a očekuje se da će u skoroj budućnosti to biti i više od 10000 osoba.

Cilj ovog završnog rada je prikazati kompleksnost rješavanja problema stabiliteta putničkih brodova. Kontinuiranim razvojom pravila za stabilitet brodova doprinosi se razvoju ovog problema, a to se posebno odnosi na stabilitet broda u oštećenom stanju. IMO i ostale organizacije donijele su niz propisa vezanih za sigurnost na putničkim brodovima, te je nužno pratiti njihove naputke kako bi se smanjio broj nesreća putničkih brodova.

Vjerojatnosni pristup koristi se za izračun vjerojatnosti preživljavanja broda nakon oštećenja. Proračuni se vrše pri određenim gazovima i vrijednostima GM kako bi se dobila najmanja GM krivulja pri kojoj postignuti indeks pregrađivanja A udovoljava minimalnoj razini sigurnosti tj. zahtijevanom indeksu pregrađivanja R (eng.: "required subdivision index R"). Pregrađivanjem broda postiže se da u slučaju oštećenja vanjske oplate u brod uđe ograničena količina vode, a brod i dalje zadržava sposobnost plovljenja.

Premda Međunaroda pomorska organizacija (IMO) konstantno radi na poboljšanju sigurnosti putničkih brodova, iskustvo je pokazalo kako se sigurnost ne može ostvariti samo usvajanjem propisa, što je vidljivo iz navedenog primjera nesreće Costa Concordie. Nužno je osigurati provođenje propisa jer njihovo usvajanje ne osigurava sigurnost, stoga je nadzor na provođenjem propisa potreban da bi se smanjio broj pomorskih nezgoda.

LITERATURA

Knjige, stručni članci, publikacije:

[1] Buljan, I.: *Stabilnost broda, Školska knjiga,* Zagreb, 1982.

[2] Marnika, F.: Stabilnost broda, Znanje, Zagreb, 1999.

[3] Marine Casualties Investigative Body Cruise Ship COSTA CONCORDIA

[4] IMO rezolucija A.265 (VIII), Regulations on Subdivision and Stability of Passenger Ships as Equivalent to Part B of Chapter II of International Convention for the Safety of Life at Sea, 1939., London, 1974.

[5] IMO rezolucija MSC.216(82), Adoption of Amendments to the International Convention for the Safety of Lifea at Sea, 1974, as amended

[6] Damage Stability of Dry Cargo and Passenger Ships

[7] PRAVILA ZA STATUTARNU CERTIFIKACIJU PUTNIČKIH BRODOVA U NACIONALNOJ PLOVIDBI stupaju na snagu dana 1. srpnja 2013. Godine

[8] Demage Stability Probabilistic Requirements

[9] Bureau Veritas, Classification rules, Pt. B, Ch. 3, Sec. 3;Pt B, Ch. 3, App. 3; July 2014 with amendments January 2016

[10] Rolf C. Imstøl, Accidents Involving Passenger Ship Stability

[11] IMO rezolucija MSC.281(85), Explanatory notes to the SOLAS chapter II-1 Subdivision and Damage Stability regulations

Internet izvori

[12] http://www.marineinsight.com/naval-architecture/water-tight-bulkheads-on-ships-construction-and-arrangement/ (20.05.2017).

[13] http://www.marineinsight.com/naval-architecture/water-tight-bulkheads-on-ships-construction-and-arrangement/ (10.06.2017).

POPIS SLIKA

Slika 1. Glavni kriteriji stabiliteta u oštećenom stanju za putničke brodove po SOLAS-u 90 .. 3
Slika 2. Rezerva stabiliteta putničkog broda u oštećenom stanju izgrađenog nakon 29. Travnja 1990 6
Slika 3. Oštećenje jedne zone 10
Slika 4. Oštećenje dvije susjedne zone 10
Slika 5. Oštećenje tri susjedne zone 11
Slika 6. Grafički prikaz teoretskog trokuta vjerojatnosti 14
Slika 7. Naplavljeno odjeljenje u spoju s vodom, ograđeno s gorne strane čvrstom palubom 16
Slika 8. Naplavljeno odjeljenje nije u spoju s vodom niti je s gornje strane ograđeno čvrstom palubm 17
Slika 9. Naplavljeno odjeljenje je u spoju s vodom a s gornje strane nije ograđeno čvrstom palubom 18
Slika 10. Gubitak uzgona kod prodora 18
Slika 11. Dodatne poprečne pregrade 20
Slika 12. Pramčana sudarna pregrada i pregrada strojarnice 21
Slika 13. Pregrade dvodna 21
Slika 14. Klizna nepropusna vrata 23
Slika 15. Ovješena nepropusna vrata 23
Slika 16. Costa Concordia nakon nesreće 24
Slika 17. Ruta broda 25
Slika 18. Zaglavljena stijena u oštećenom području 26
Slika 19. Opseg oštećenja 27
Slika 20. Uzdužni i poprečni prikaz naplavljenih područja 27
Slika 21. Moment nagiba 29
Slika 22. Kut nagiba 29
Slika 23. Situacija 1 30
Slika 24. Opseg poplava za situaciju 1 i situaciju 10 30
Slika 25. GZ krivulja uz pretpostavku da nema progresivnog naplavljivanja za situaciju 1 i situaciju 10 31
Slika 26. Situacija 10 32
Slika 27. Nasukanje broda drugi put 32

POPIS TABLICA

Tablica 1. Prostori i njihova naplavljivost 7
Tablica 2. Naplavljeni prostori 28