

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Ivan Tomljenović  
**Numeričko istraživanje utjecaja interferencije na  
ukupni otpor katamarana Delft 372**

Zagreb, 2022.

Ovaj rad izrađen je na Katedri za hidromehaniku plovnih objekata pri Zavodu za brodogradnju i pomorsku tehniku Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, pod vodstvom mentorice prof. dr. sc. Nastie Degiuli i komentora dr. sc. Andree Farkasa te je predan na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2021./2022. Rad je izrađen u sklopu projekta IP-2020-02-8568 Hrvatske zaklade za znanost.

Ivan Tomljenović

**SADRŽAJ**

POPIS SLIKA .....	IV
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA .....	VII
POPIS KRATICA .....	IX
1. UVOD.....	1
2. PREGLED LITERATURE.....	3
3. MATEMATIČKI MODEL.....	5
3.1. Vremenski osrednjene Navier-Stokesove jednačbe .....	5
3.2. Model turbulencije .....	5
3.3. Bezdimenzijske značajke .....	6
3.4. Verifikacija rezultata .....	7
3.5. Validacija rezultata.....	8
3.6. Faktor interferencije .....	8
4. PRIPREMA NUMERIČKIH SIMULACIJA .....	9
4.1. Pregled glavnih značajki modela katamarana .....	9
4.2. Proračunska domena .....	9
4.3. Rubni uvjeti .....	10
4.4. Diskretizacija proračunske domene primjenom fiksne mreže .....	11
4.4.1. Granični sloj .....	12
4.4.2. Slobodna površina .....	13
4.4.3. Kelvinov kut.....	14
4.5. Diskretizacija proračunske domene primjenom preklapajuće mreže.....	14
4.6. Usporedba broja ćelija domena primjenom fiksne i preklapajuće mreže .....	15
4.7. Fizikalni model numeričke simulacije .....	16
4.8. Zadavanje numeričkog rješavača (eng. <i>Solver</i> ).....	16
5. ANALIZA REZULTATA .....	18
5.1. Verifikacija rezultata .....	18
5.2. Validacija rezultata.....	19
5.3. Validacija rezultata s drugim eksperimentom .....	22

5.4. Faktor interferencije .....	23
5.5. Slike valova .....	25
5.6. Položaj slobodne površine i raspodjela tangencijalnih naprezanje .....	29
5.7. Profil valova u uzdužnoj simetralnoj ravnini .....	31
5.8. Usporedba trima dobivenog numeričkim simulacijama primjenom fiksne i preklapajuće mreže.....	33
6. ZAKLJUČAK.....	35
ZAHVALE .....	37
LITERATURA.....	38
SAŽETAK.....	41
SUMMARY .....	42

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Ovisnost bezdimenzijske značajke brzine o bezdimenzijskoj udaljenosti od stijenke .	6
Slika 2. Geometrija katamarana .....	9
Slika 3. Dimenzije proračunske domene.....	10
Slika 4. Rubni uvjeti domene .....	11
Slika 5. Diskretizacija graničnog sloja uz model jednotrupnog broda Delft 372 .....	12
Slika 6. Parametar $y^+$ po trupu jednotrupnog broda.....	13
Slika 7. Diskretizacija slobodne površine .....	13
Slika 8. Fina mreža modela jednotrupnog broda Delft 372 pri $Fr = 0,75$ (pogled odozgo)....	14
Slika 9. Domena diskretizirana primjenom preklapajuće mreže.....	15
Slika 10. Fizikalni model viskoznog strujanja .....	16
Slika 11. Ovisnost faktora interferencije o $Fr$ dobiven numeričkim simulacijama (gore) i eksperimentalno (dolje).....	24
Slika 12. Slika valova za katamaran s razmakom između tupova $H/L = 0,167$ pri $Fr = 0,5$ (gore) i $H/L = 0,300$ pri $Fr = 0,35$ (dolje) .....	26
Slika 13. Slika valova dobivena primjenom fiksne (dolje) i preklapajuće mreže (gore) za katamaran s razmakom između trupova $H/L = 0,167$ pri $Fr = 0,35$ .....	27
Slika 14. Slika valova dobivena primjenom fiksne (gore) i preklapajuće mreže (dolje) za katamaran s razmakom između trupova $H/L = 0,167$ pri $Fr = 0,75$ .....	28
Slika 15. Usporedba slika valova dobivenih numeričkim simulacijama (dolje) i eksperimentalno (gore) za katamaran s razmakom između trupova $H/L = 0,233$ pri $Fr = 0,3$ .....	29
Slika 16. Usporedba slika valova dobivenih numeričkim simulacijama (dolje) i eksperimentalno (gore) za katamaran s razmakom između trupova $H/L = 0,233$ pri $Fr = 0,5$ .....	29
Slika 17. Prikaz slobodne površine po unutarnjem (dolje) i vanjskom dijelu (gore) trupa katamarana s razmakom između trupova $H/L = 0,3$ pri $Fr = 0,35$ .....	30
Slika 18. Prikaz slobodne površine po unutarnjem (dolje) i vanjskom dijelu (gore) trupa katamarana s razmakom između trupova $H/L = 0,167$ pri $Fr = 0,35$ .....	30
Slika 19. Prikaz tangencijalnog naprezanja po unutarnjem dijelu trupa katamarana s razmakom između trupova $H/L = 0,300$ (gore) i $H/L = 0,167$ (dolje) pri $Fr = 0,35$ .....	31

Slika 20. Profil valova u uzdužnoj simetralnoj ravnini za tri razmaka između trupova katamarana pri  $Fr = 0,35$  ..... 32

Slika 21. Profil valova u uzdužnoj simetralnoj ravnini za katamaran s razmakom između trupova  $H/L = 0,233$  pri tri  $Fr$  ..... 32

Slika 22. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka po unutarnjem dijelu trupa katamarana s razmakom između trupova  $H/L = 0,300$  dobivena primjenom fiksne (gore) i preklapajuće (dolje) mreže ..... 34

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Tipovi konvergencije.....	7
Tablica 2. Glavne značajke modela jednotrupnog broda Delft 372 [1] .....	9
Tablica 3. Postavke diskretizacije graničnog sloja za model jednotrupnog broda Delft 372	12
Tablica 4. Usporedba broja ćelija domene diskretizirane preklapajućom i fiksnom mrežom .	15
Tablica 5. Određivanje numeričke nesigurnosti mreže .....	18
Tablica 6. Određivanje numeričke nesigurnosti vremenskog koraka .....	18
Tablica 7. Numerička nesigurnost mreže, vremenskog koraka i ukupna numerička nesigurnost .....	19
Tablica 8. Usporedba ukupnog otpora i trima jednotrupnog broda s eksperimentalnim rezultatima .....	19
Tablica 9. Usporedba ukupnog otpora za tri katamarana modela Delft 372 dobivenog numeričkim simulacijama i eksperimentalnim ispitivanjima.....	20
Tablica 10. Usporedba kuta trima katamarana modela Delft 372 dobivenih numeričkim simulacijama i eksperimentalnim ispitivanjima .....	21
Tablica 11. Usporedba ukupnog otpora za modele katamarana Delft 372 dobivenog numeričkim simulacijama uz primjenu preklapajuće mreže s eksperimentalnim rezultatima .....	21
Tablica 12. Usporedba ukupnog otpora katamarana s razmakom između trupova $H/L = 0,233$ dobivenog numeričkim simulacijama s eksperimentalnim rezultatima .....	22
Tablica 13. Usporedba kuta trima katamarana s razmakom $H/L = 0,233$ dobivenog numeričkim simulacijama i eksperimentalnim ispitivanjima.....	23
Tablica 14. Vrijednosti faktora interferencije pri $Fr = 0,35$ .....	25
Tablica 15. Usporedba kuta trima dobivenog numeričkim simulacijama za katamarane s različitim razmacima između trupova pri $Fr = 0,35$ primjenom fiksne i preklapajuće mreže.....	33

**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
$b$	m	širina trupa
$Fr$	/	Froudeov broj
$g$	$m/s^2$	gravitacijska konstanta
$H$	m	razmak između trupova katamarana
$I_f$	/	faktor interferencije
$I_{f_0,167}$	/	faktor interferencije katamarana na razmaku $H/L = 0,167$
$I_{f_0,233}$	/	faktor interferencije katamarana na razmaku $H/L = 0,233$
$I_{f_0,3}$	/	faktor interferencije katamarana na razmaku $H/L = 0,3$
$KG$	m	vertikalni položaj težišta mase
$LCG$	m	horizontalni položaj težišta mase
$L_{WL}$	m	duljina vodne linije
$L_{OA}$	m	duljina preko svega
$L_{pp}$	m	duljina između perpendikulara
$p$	$N/m^2$	tlak
$p_d$	$N/m^2$	hidrodinamički tlak
$p_i$	/	red točnosti
$Re$	/	Reynoldsov broj
$R_i$	/	omjer konvergencije
$R_T$	N	ukupni otpor broda
$R_{T_k}$	N	ukupni otpor katamarana
$R_{T_m}$	N	ukupni otpor jednotrupnog broda
$S$	$m^2$	oplakana površina
$S_L$	/	najmanja vrijednost numeričkog rješenja
$S_U$	/	najveća vrijednost numeričkog rješenja
$T$	m	gaz
$T$	s	period definiran kao omjer duljine i brzine broda
$u$	m/s	brzina
$\overline{U_{SN}}$	/	ukupna numerička nesigurnost
$\overline{U_i}$	/	nesigurnost
$\overline{U_G}$	/	nesigurnost mreže
$\overline{U_T}$	/	nesigurnost vremenskog koraka
$v$	m/s	brzina broda
$v_j$	m/s	vektor brzine
$x_j$	/	koordinatne osi
$y^+$	/	bezdimenzijska udaljenost od stijenke
$\rho$	$kg/m^3$	gustoća fluida
$\Delta$	kg	masa istisnine
$\Delta t$	s	vremenski korak



---

$\tau$	$\text{N/m}^2$	smično naprezanje
$\tau^o$	/	trim broda
$\delta_{RE}^*$	/	numerička pogreška
$\tau_w$	$\text{N/m}^2$	smično naprezanje na stijenci
$\nu$	$\text{m}^2/\text{s}$	kinematički koeficijent viskoznosti
$\mu$	$\text{Pa s}$	dinamički koeficijent viskoznosti
$\mu_t$	$\text{Pa s}$	dinamički koeficijent turbulentne viskoznosti
$\varepsilon_i$	/	razlike rezultata
$\Phi_i$	/	fizikalna veličina

**POPIS KRATICA**

<i>CFD</i>	-Computational Fluid Dynamics, Računalna dinamika fluida
<i>RANSE</i>	-Reynolds Averaged Navier Stokes Equations
<i>SST</i>	-Shear Stress Transport

## 1. UVOD

Istraživanje i razvoj katamarana porasli su posljednjih stotinjak godina zbog njihovih boljih značajki, pogotovo pri većim brzinama, u usporedbi sa jednotrupnim brodom. Katamarani imaju bolji stabilitet i upravljivost od jednotrupnih brodova te zbog svoje brzine često primijenjeni u civilne svrhe za prijevoz putnika. Kako bi se postigle željene prednosti u odnosu na jednotrupni brod potrebno je istraživati značajke katamarana u plovidbi. Najzanimljiviji, ali i vrlo kompleksni problem je strujanje između trupova katamarana. Strujanje između trupova katamarana uzrokuje interferenciju koja utječe na hidrodinamičke značajke katamarana. Interferencija može biti povoljna ili nepovoljna, gdje je kod povoljne interferencije ukupni otpor katamarana manji od dvostruke vrijednosti ukupnog otpora jednotrupnog broda iste forme, dok je kod nepovoljne interferencije ukupni otpor katamarana veći od dvostruke vrijednosti ukupnog otpora jednotrupnog broda iste forme. U ovom radu pojava interferencije analizirat će se primjenom faktora interferencije, gdje negativna vrijednost faktora interferencije predstavlja povoljnu, a pozitivna vrijednost ovog faktora nepovoljnu interferenciju.

Ispitivanje hidrodinamičkih značajki može se provesti eksperimentalnim ili numeričkim putem. Numeričke simulacije pokazale su se kao vrijedan alat u određivanju hidrodinamičkih značajki broda te će se stoga pojava interferencije ispitati primjenom numeričkih simulacija. Numeričke simulacije temeljene na računalnoj dinamici fluida (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) provedene su u programu STAR-CCM+. Ispitan je utjecaj Froudeovog broja ( $Fr$ ) i razmaka između trupova katamarana na pojavu interferencije. Ispitivanje je provedeno na modelu broda Delft 372 pri šest različitih brzina za jednotrupni brod te katamarane sa tri različita razmaka trupova.

Pojava interferencije direktno je povezana s iznosom trima i poniranja katamarana [1] te je stoga točna procjena ovih vrijednosti od iznimne važnosti. Zbog složenog strujanja uzrokovanog pojavom interferencije te gibanjem s dozvoljenim stupnjevima slobode, poželjno je primijeniti preklapajuću (eng. *overset*) mrežu kako bi se dobili što točniji rezultati. Međutim, numeričke simulacije uz primjenu preklapajućih mreža su veoma računalno zahtjevne te njihovo provođenje može potrajati nekoliko dana. Stoga će cilj ovoga rada biti postizanje zadovoljavajućih rezultata vezanih uz određivanje povoljne interferencije primjenom fiksne mreže.

Prije ispitivanja pojave interferencije proveden je postupak verifikacije i validacije rezultata. Postupak verifikacije proveden je prema preporukama ITTC-a (*International Towing Tank Conference*) te je određena numerička nesigurnost pri određivanju ukupnog otpora. Postupak validacije proveden je usporedbom dobivenih numeričkih rezultata s eksperimentalnim rezultatima [1]. Nakon postupka verifikacije i validacije, pojava interferencije ispitana je analizom faktora interferencije te je određeno pri kojem će se  $Fr$  i razmaku trupova katamarana postići povoljna interferencija. Konačno, provedena je detaljna analiza strujanja oko jednotrupnog broda i katamarana te su objašnjeni uzroci pojave interferencije.

## 2. PREGLED LITERATURE

Katamarani se često koriste u komercijalne i vojne svrhe, pogotovo pri višim brzinama gdje imaju prednosti u pogledu stabiliteta, brzine i upravljivosti u odnosu na jednotrupni brod iste forme [1]. Kako bi se kod zadane forme postigle bolje hidrodinamičke značajke, potrebno je istražiti pojavu interferencije kod katamarana. Zbog složene interakcije valova između trupova katamarana strujanje oko katamarana i između njegovih trupova nije simetrično [2] te je kut između poprečnih i razilaznih valova manji od Kelvinovog kuta [3]. S obzirom da strujanje nije simetrično oko jednog trupa katamarana, kao što je to slučaj kod jednotrupnih brodova, ukupni otpor katamarana nije jednak dvostrukoj vrijednosti ukupnog otpora jednotrupnog broda [4]. Interferencija može biti povoljna ili nepovoljna u smislu ukupnog otpora katamarana. Interferencija se općenito dijeli na valnu i viskoznu interferenciju, pri čemu valna interferencija predstavlja značajniju komponentu interferencije. Valna interferencija posljedica je interakcije valova između trupova katamarana [5]. Na valnu interferenciju utječe razmak između trupova katamarana te brzina plovidbe katamarana, gdje se pri manjim brzinama generiraju valovi manje valne visine koji ne utječu značajnije na ukupni otpor katamarana, dok se pri visokim  $Fr$  brojevima interferencija valova pomiče izvan prostora između trupova katamarana, to jest iza broda te iz tog razloga manje utječe na ukupni otpor katamarana [6]. Numeričkim simulacijama viskoznog strujanja oko katamarana serije S60 pokazano je da se s povećanjem brzine plovidbe valni brijeg pramčanog sustava valova pomiče prema krmi broda [7]. Visoka cijena eksperimentalnih ispitivanja i razvoj računala najviše su utjecali na razvoj računalne dinamike fluida, koja danas ima veliku ulogu u proračunima hidrodinamičkih značajki brodova. Prilikom provođenja numeričkih simulacija vrlo je važno validirati rezultate usporedbom s eksperimentalnim rezultatima. Stoga je kombinacija eksperimenta i računalnih simulacija optimalan način za određivanje hidrodinamičkih značajki brodova [8]. Pri manjim razmacima između trupova katamarana interferencija je izraženija te se za najmanji razmak i najveću brzinu plovidbe dobiva najveći ukupni otpor katamarana [9]. Reynoldsove osrednjene Navier-Stokesove jednadžbe (engl. *Reynolds Averaged Navier-Stokes equations* - RANSE) vrlo su prikladne za numeričke simulacije strujanja oko katamarana koji plove pri srednjim brzinama [10]. Nestacionarne Reynoldsove osrednjene Navier-Stokesove jednadžbe primijenjene su za numeričko određivanje ukupnog otpora, kuta trima i urona katamarana te je pokazano kako točnost dobivenih rezultata ovisi o kvaliteti geometrijske mreže [11]. Pri većoj brzini plovidbe dolazi do zatege uslijed različite raspodjele tlaka po trupu broda koja uzrokuje negativan kut trima [11]. Fiksna mreža ne prati dinamički kut trima stoga veće vrijednosti kuta trima uzrokuju

poteškoće kod numeričkih simulacijama s fiksnom mrežom. Kod izraženijih gibanja broda koristi se preklapajuća (eng. *overset*) mreža čija je prednost, u odnosu na fiksnu mrežu, što nema potrebe za ponovnom diskretizacijom domene pri značajnijem pomaku broda [12]. Preklapajuću mrežu potrebno je koristiti prilikom većih pomaka broda kao što je slučaj prilikom plovidbe broda na valovima [13]. Kvaliteta generirane preklapajuće mreže utjecat će na točnost rezultata [14], gdje se odstupanje ukupnog otpora od eksperimentalnih rezultata značajno smanjilo korištenjem kvalitetnije mreže, dok trim i uron broda nisu toliko ovisili o kvaliteti mreže.

### 3. MATEMATIČKI MODEL

#### 3.1. Vremenski osrednjene Navier-Stokesove jednadžbe

Vremenski osrednjene Navier-Stokesove jednadžbe ili Reynoldsove osrednjene Navier-Stokesove jednadžbe (*RANSE*) koriste se u računalnoj dinamici fluida za opisivanje viskoznog strujanja fluida. Fizikalno predstavljaju zakon očuvanja mase te zakon očuvanja količine gibanja. Vremenski se osrednjuju zbog pojednostavljenja proračuna te korištenja osrednjenih vrijednosti u inženjerskoj praksi. Opisane jednadžbe zapisuju se na sljedeći način [15]:

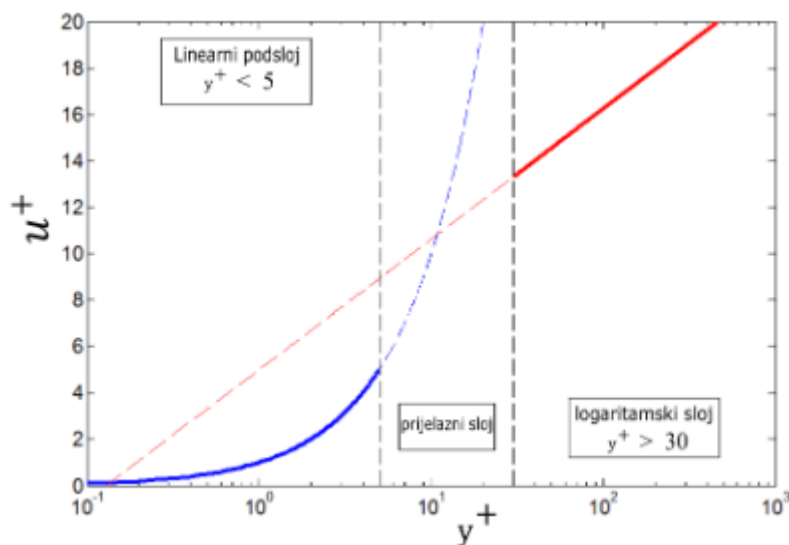
$$\frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{v}_j \bar{v}_i) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho v'_i v'_j} \right] \quad (2)$$

gdje  $v_i$  označava komponente brzine,  $p$  je tlak,  $\rho$  predstavlja gustoću fluida, a  $\mu$  označava dinamički koeficijent viskoznosti. Element  $\overline{\rho v'_i v'_j}$  predstavlja tenzor Reynoldsovih naprezanja koji unosi nove nepoznanice u sustav jednadžbi. Tenzor Reynoldsovih naprezanja opisuje pulsirajuće strujanje te sustav jednadžbi nije zatvoren, jer imamo više nepoznanica nego jednadžbi. Sustav se zatvara dodatnim jednadžbama za modeliranje turbulencije te će se u ovom radu koristiti  $k - \omega$  SST (Shear Stress Transport) model turbulencije, koji dobro rješava strujanje unutar i izvan graničnog sloja.

#### 3.2. Model turbulencije

Za numeričke simulacije korišten je  $k - \omega$  SST model turbulencije koji predstavlja kombinaciju  $k - \varepsilon$  i  $k - \omega$  modela turbulencije [19]. Pri niskim lokalnim vrijednostima Reynoldsovih brojeva odnosno u linearnom podsloju graničnog sloja koristi se  $k - \omega$  model turbulencije, dok se  $k - \varepsilon$  model turbulencije koristi u proračunima s visokim vrijednostima Reynoldsovih brojeva, odnosno izvan graničnog sloja. Iz tog razloga  $k - \omega$  SST model turbulencije primjenjiv je u logaritamskom i linearnom podsloju bezdimenzijskog profila brzina na stijenci te se položaj prve ćelije generirane mreže može proizvoljno postaviti u jedan od ta dva podsloja. Slika 1. prikazuje ovisnost bezdimenzijskih značajki brzine ( $u^+$ ) o udaljenosti od stijenke ( $y^+$ ) [20].



Slika 1. Ovisnost bezdimenzijske značajke brzine o bezdimenzijskoj udaljenosti od stijenke

### 3.3. Bezdimenzijske značajke

Često korištene bezdimenzijske značajke u brodskoj hidrodinamici su Reynoldsov i Froudeov broj. Reynoldsov broj predstavlja omjer inercijskih i viskoznih sila i za potrebe brodske hidrodinamike određuje se na sljedeći način [16]:

$$Re = \frac{v L_{WL}}{\nu} \quad (3)$$

gdje je  $L_{WL}$  duljina vodne linije broda, a  $\nu$  kinematički koeficijent viskoznosti fluida.

Reynoldsov broj bitan je kriterij za određivanje tipa strujanja to jest da li je strujanje laminarno ili turbulentno. Kritična vrijednost Reynoldsovog broja pri kojemu laminarno strujanje prelazi u turbulentno iznosi  $Re \approx 3 \cdot 10^5$ . Vrijedno je napomenuti da je mehanizam prijelaza iz laminarnog u turbulentno strujanje jako složen te samim time nije moguće egzaktno odrediti točku prijelaza.

Froudeov broj predstavlja omjer inercijske i gravitacijske sile, a u brodskoj hidrodinamici može se zapisati na sljedeći način [16]:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g L_{WL}}} \quad (4)$$

gdje je  $g$  gravitacijska konstanta.



### 3.4. Verifikacija rezultata

U ovom radu postupak verifikacije rezultata proveden je za iznos ukupnog otpora broda za što je potrebno minimalno tri numerička rješenja. Postupak verifikacije proveden je za gustoću mreže i vremenski korak te je izračunata numerička nesigurnost primjenom metode koja se oslanja na Richardsonovu ekstrapolaciju [17]. Ukupna numerička nesigurnost simulacije sastoji se od nesigurnosti mreže i vremenskog koraka:

$$\overline{U_{SN}} = \sqrt{U_G^2 + U_T^2} \quad (5)$$

Za određivanje tipa konvergencije važno je odrediti omjer konvergencije:

$$R_i = \frac{\varepsilon_{i,21}}{\varepsilon_{i,32}} \quad (6)$$

gdje je  $\varepsilon_{i,21}$  razlika rješenja dobivenih primjenom srednje i fine mreže, a  $\varepsilon_{i,32}$  predstavlja razliku rješenja dobivenih primjenom grube i srednje mreže.

Ovisno o omjeru konvergencije postoje tri tipa konvergencije, tablica 1. U tablici 1. dani su izrazi za određivanje numeričke nesigurnosti mreže ili vremenskog koraka, gdje  $S_U$  označava najveću, a  $S_L$  najmanju vrijednost numeričkog rezultata.

**Tablica 1. Tipovi konvergencije**

Omjer konvergencije	Tip konvergencije	Numerička nesigurnost
$-1 < R_i < 0$	Oscilatorna konvergencija	$U_i = \frac{S_U - S_L}{2}$
$0 < R_i < 1$	Monotona konvergencija	$U_i = 1,25  \delta_{RE}^* $
$ R_i  > 1$	Divergencija	$U_i =  S_U - S_L $

Nadalje,  $\delta_{RE}^*$  računa se prema:

$$\delta_{RE}^* = \frac{\varepsilon_{i,21}}{r_i^{p_i} - 1} \quad (7)$$

gdje je  $r_i$  omjer profinjenja, a  $p_i$  se određuje kao:

$$p_i = \frac{\ln\left(\frac{\varepsilon_{i,32}}{\varepsilon_{i,21}}\right)}{\ln(r_i)} \quad (8)$$

### 3.5. Validacija rezultata

Rezultati ovog numeričkog istraživanja uspoređeni su s dva eksperimenta dostupna u literaturi [1] i [18]. Numeričko i eksperimentalno istraživanje provedeno je na istome modelu katamarana Delft 372. Relativno odstupanje numeričkih rezultata od eksperimentalnih je određeno prema:

$$RD = \frac{\Phi_{RDF} - \Phi_{EXP}}{\Phi_{EXP}} \cdot 100\% \quad (9)$$

gdje  $RD$  predstavlja relativno postotno odstupanje,  $\Phi_{RDF}$  rezultat je dobiven numeričkom simulacijom, dok  $\Phi_{EXP}$  predstavlja eksperimentalno dobiven rezultat.

### 3.6. Faktor interferencije

Pojava interferencije u ovom radu analizirana je putem faktora interferencije. Faktor interferencije određuje se usporedbom ukupnog otpora katamarana i dvostruke vrijednosti ukupnog otpora jednotrupnog broda iste forme prema sljedećoj formuli:

$$I_f = \frac{R_{T_k} - 2R_{T_m}}{2R_{T_m}} \quad (10)$$

gdje  $R_{T_k}$  označava ukupni otpor katamarana, a  $R_{T_m}$  ukupni otpor jednotrupnog broda (eng. *monohull*) iste forme.

## 4. PRIPREMA NUMERIČKIH SIMULACIJA

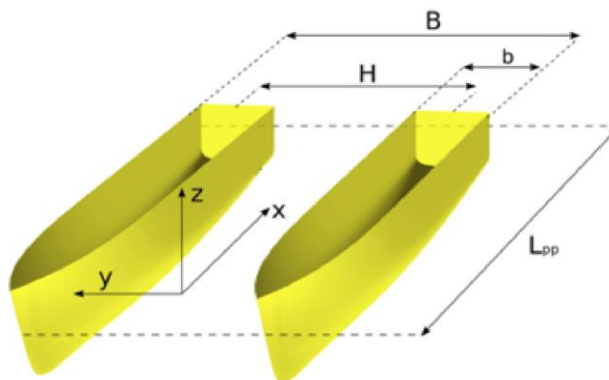
### 4.1. Pregled glavnih značajki modela katamarana

U tablici 2. prikazani su glavne značajke jednotrupnog broda preuzete iz literature [1].

Tablica 2. Glavne značajke modela jednotrupnog broda Delft 372 [1]

Podatak	Simbol	Vrijednost	Mjerna jedinica
Duljina preko svega	$L_{OA}$	3,11	m
Duljina između perpendikulara	$L_{pp}$	3	m
Širina trupa	$b$	0,24	m
Gaz	$T$	0,15	m
Masa istisnine	$\Delta$	43,535	kg
Vertikalni položaj težišta mase	$KG$	0,34	m
Uzdužni položaj težišta mase	$LCG$	1,41	m

Slika 2. prikazuje definiciju veličina iz tablice 2. i geometriju katamarana. Na slici 2.  $H$  predstavlja razmak između trupova katamarana točnije razmak između uzdužnih simetralnih ravnina pojedinih trupova katamarana.

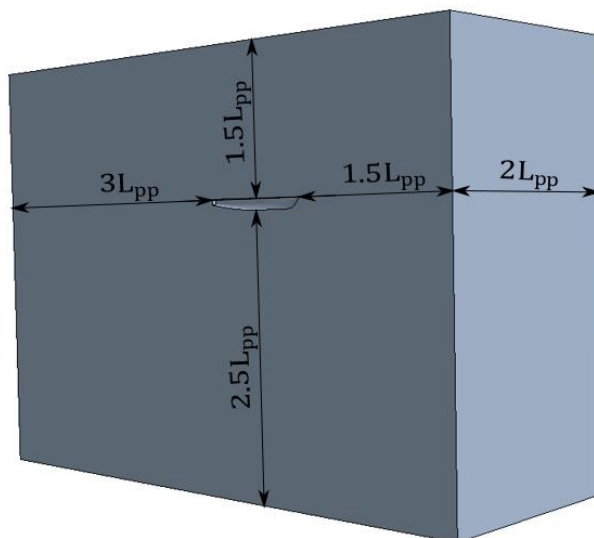


Slika 2. Geometrija katamarana

### 4.2. Proračunska domena

Kako bi se izbjegla refleksija valova od rubova domene potrebno je rubove domene dovoljno udaljiti od modela broda [21]. Isto tako izbjegava se modeliranje prevelike domene koja će

generirati previše ćelija i time nepotrebno produžiti vrijeme trajanja numeričke simulacije. Dimenzije domene odabrane su prema preporukama ITTC-a te su kotirane na slici 3.

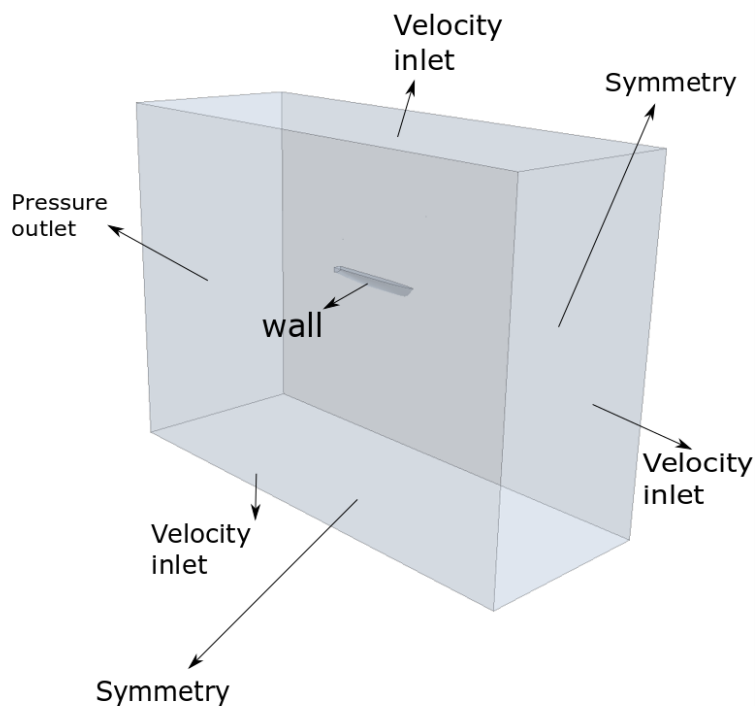


Slika 3. Dimenzije proračunske domene

### 4.3. Rubni uvjeti

Kako proračunska domena predstavlja dio prostora okoline potrebno je zadati rubne uvjete na njenim granicama koji predstavljaju interakciju proračunske domene sa okolinom. Rubni uvjeti zadaju se tako da što fizikalnije opisuju stvarni problem. S obzirom da je brod simetričan u odnosu na uzdužnu simetralnu ravninu očekuje se i simetrično strujanje oko njega, stoga se na uzdužnoj simetralnoj ravnini koristi rubni uvjet simetrije. Kod katamarana ravnina simetrije nalazi se na polovini međusobnog razmaka trupova katamarana.

Slika 4. prikazuje zadane rubne uvjete na granicama proračunske domene. Numeričke simulacije provode se tako da brod miruje, a fluid nastrujava na njega. Kroz trup broda nema protoka, stoga se na njega postavlja rubni uvjet zida (eng. *wall*). Na ulaznoj, donjoj i gornjoj granici zadan je Dirichletov rubni uvjet, odnosno zadana je brzina strujanja, dok izlaznu granicu definira von Neumannov rubni uvjet, gdje je postavljen gradijent tlaka čiji je iznos jednak nuli.



Slika 4. Rubni uvjeti domene

#### 4.4. Diskretizacija proračunske domene primjenom fiksne mreže

Proračunska domena diskretizirana je korištenjem alata automatskog generiranja mreže iz programa STAR-CCM+ (eng. *Automated Mesh*) u kojemu su parametri zadani prema STAR-CCM+ *tutorialu* za simulaciju otpora kontejnerskog broda [22]. Zbog tranzijentnih pojava u pokusu otpora u numeričkim simulacijama potrebno je primijeniti nestacionarne Reynoldsove osrednjene Navier – Stokesove jednadžbe, odnosno primijeniti vremensku diskretizaciju. Za izradu kvalitetne mreže potrebno je finije ili grublje diskretizirati pojedine regije proračunske domene. Profinjuju se volumeni gdje se očekuju veliki gradijenti fizikalnih veličina te unutar simulacija vezanih uz probleme brodske hidrodinamike posebnu pažnju treba posvetiti sljedećim dijelovima proračunske domene:

- graničnom sloju,
- slobodnoj površini i
- Kelvinovom kutu.

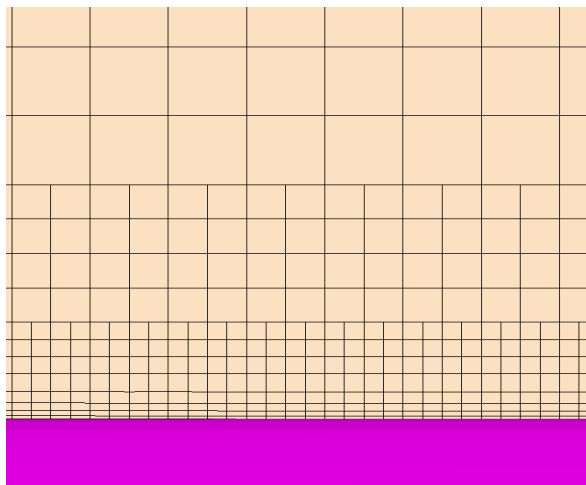
#### 4.4.1. Granični sloj

Zbog činjenice da je brzina fluida na trupu broda jednaka nuli formira se granični sloj koji ima veliki gradijent tlaka i brzine te prema iznesenom u prijašnjem potpoglavlju potrebno ga je finije diskretizirati [23]. Dakle granični sloj razvija se u blizini trupa broda te se najčešće diskretizira prizmatičnim ćelijama čije su normale okomite na površinu trupa broda. Granični sloj diskretiziran je prema podacima danim u tablici 3.

**Tablica 3. Postavke diskretizacije graničnog sloja za model jednotrupnog broda Delft 372**

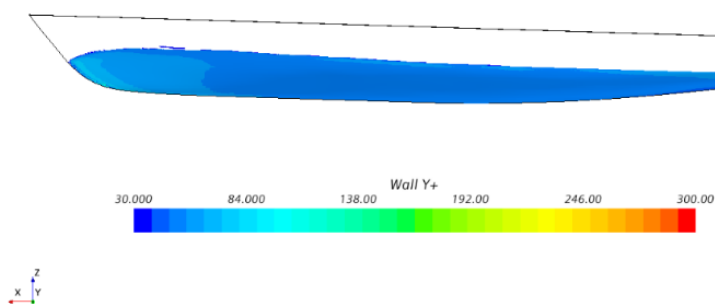
Opcija	Vrijednost	Mjerna jedinica
Debljina graničnog sloja	0,004	m
Broj ćelija u graničnom sloju	3	/
Faktor povećanja ćelija	1,4	/

Pri diskretizaciji graničnog sloja potrebno je osigurati postepen prijelaz s posljednje ćelije graničnog sloja na osnovnu mrežu kako ne bi došlo do neželjene numeričke difuzije. Slika 5. prikazuje granični sloj te postepeni prijelaz ćelija graničnog sloja na osnovnu mrežu.



**Slika 5. Diskretizacija graničnog sloja uz model jednotrupnog broda Delft 372**

Kako bi se generirao manji broj ćelija i smanjilo vrijeme proračuna prva se ćelija najčešće postavlja u inercijski podsloj koji se nalazi u području bezdimenzijske značajke  $y^+$  u granicama  $30 < y^+ < 300$  [24]. Postavljanjem prve ćelije u inercijski podsloj omogućena je primjena zidnih funkcija za opisivanje fizikalnih pojava unutarnjeg dijela graničnog sloja.

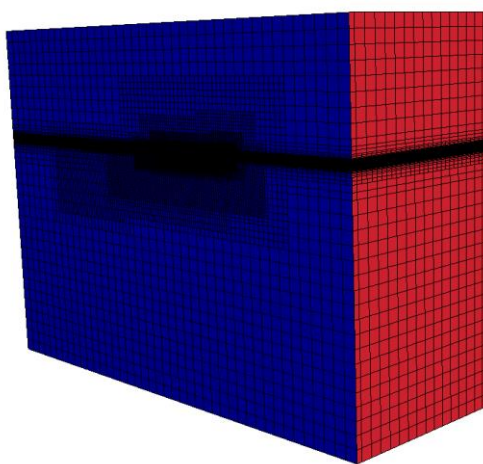


**Slika 6. Parametar  $y^+$  po trupu jednotrupnog broda**

Vrijednost bezdimenzijskog parametra  $y^+$  nalazi se u navedenim granicama kao što to potvrđuje slika 6. te je stoga opravdana primjena zidnih funkcija.

#### **4.4.2. Slobodna površina**

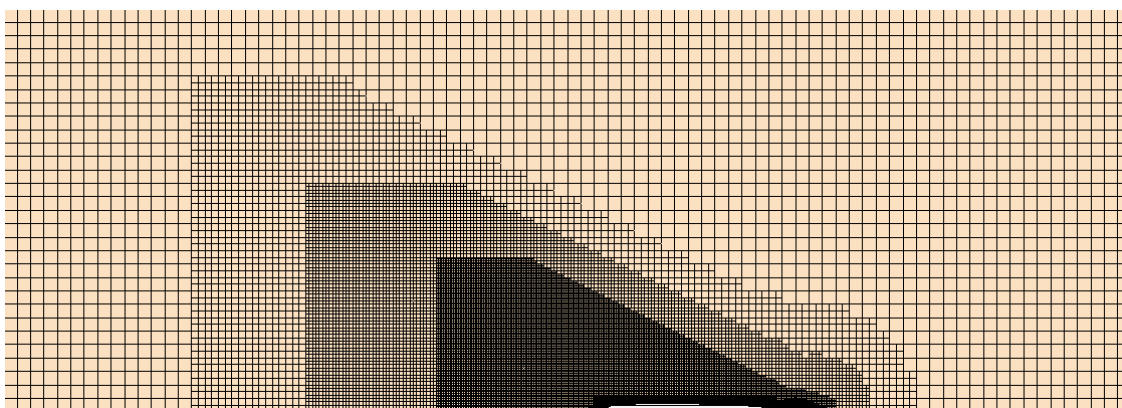
Nastrujavanjem fluida na trup broda formiraju se valovi na slobodnoj površini. Za ispravno dobivanje slike valova potrebno je finije diskretizirati slobodnu površinu. Visina profinjenja mreže u području slobodne površine određena je prema vrijednostima visine valova iz eksperimenta [1] te se težilo osigurati 20 ćelija po valnoj visini prema preporuci ITTC-a [21]. Na slici 7. prikazana je diskretizacija proračunske domene te je moguće uočiti finiju diskretizaciju u području slobodne površine. Vidljiva su i dodatna profinjenja oko modela broda u blizini krme, trupa i pramca zbog većih očekivanih gradijenata fizikalnih veličina u tom području.



**Slika 7. Diskretizacija slobodne površine**

#### 4.4.3. Kelvinov kut

Kut između poprečnih i razilaznih valova u dubokoj vodi ne ovisi o formi broda te iznosi  $19^{\circ}28'$ , a naziva se Kelvinov kut. Stoga je potrebno profinirati to područje proračunske domene kreiranjem profinjenja unutar pravokutnih elemenata zakrenutih za Kelvinov kut. Profinjenja su podijeljena u tri kategorije gustoće mreže od kojih je ona bliže brodu najfinije diskretizirana, Slika 8.



Slika 8. Fina mreža modela jednotrupnog broda Delft 372 pri  $Fr = 0,75$  (pogled odozgo)

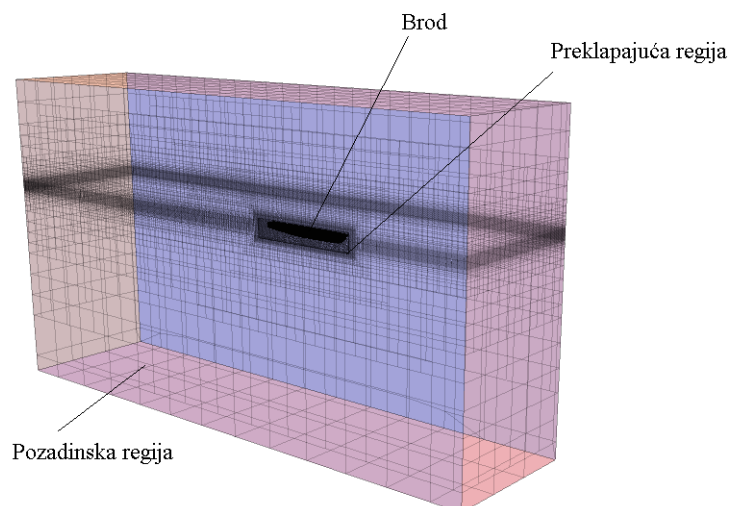
#### 4.5. Diskretizacija proračunske domene primjenom preklapajuće mreže

Preklapajuće mreže generirane su uz prethodno navedena profinjenja slobodne površine, Kelvinovog kuta i graničnog sloja. Dodatno je još izrađena preklapajuća regija koja obuhvaća područje oko trupa broda. Proračunska domena numeričkih simulacija s preklapajućom mrežom podijeljena je na dva dijela, odnosno pozadinsku i preklapajuću regiju, slika 9. Zbog dodatnih profinjenja mreže u području preklapajuće regije te prijelaza na pozadinsku mrežu generirano je značajno više ćelija u odnosu na fiksnu mrežu. Preklapajuće mreže generirane su za četiri simulacije pri brzini koja odgovara  $Fr = 0,35$ , gdje se očekuje povoljna interferencija prema eksperimentalnom istraživanju [1].

Nepomična mreža za diskretizaciju prostora ne prati dinamički trim niti poniranje broda u vremenu. Kako se brod giba kroz proračunsku domenu s dozvoljenim stupnjevima slobode gibanja početna mreža za veće pomake prestaje biti adekvatna za rješavanje problema te je potrebno izraditi novu mrežu. Kod primjene preklapajuće mreže nije potrebno generirati novu mrežu, jer se preklapajuća regija giba zajedno s brodom te prati njegovo poniranje i trim. Ćelije



pozadinske regije, koje se nalaze unutar preklapajuće regije su pasivne, odnosno u njima se ne računaju polja fizikalnih veličina sve dok se preklapajuća regija ne pomakne te one postaju aktivne. Prijelaz između preklapajuće i pozadinske regije finije je diskretiziran kako bi se osigurala adekvatna interpolacija fizikalnih veličina između dvije regije.



**Slika 9. Domena diskretizirana primjenom preklapajuće mreže**

#### 4.6. Usporedba broja ćelija domena diskretiziranih primjenom fiksne i preklapajuće mreže

Pri svim ispitanim brzinama primijenjena je fina mreža kojoj veličina osnovne ćelije iznosi 0,025 m. Pregled broja generiranih ćelija proračunskih domena dan je u tablici 4. za preklapajuću i fiksnu mrežu jednotrupnog broda i katamarana. Broj ćelija u numeričkim simulacijama pokusa otpora katamarana veći je od broja ćelija u numeričkim simulacijama pokusa otpora jednotrupnog broda, zbog toga što je kod katamarana potrebno finije diskretizirati prostor između trupova katamarana gdje se pojavljuje kompleksna interferencija valova.

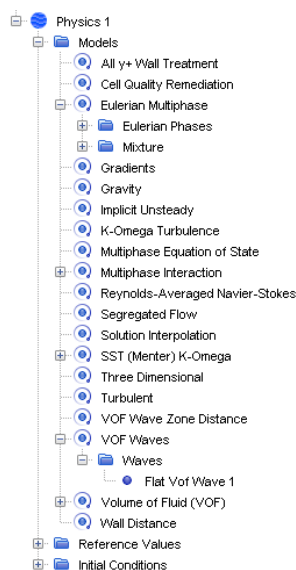
**Tablica 4. Usporedba broja ćelija domene diskretizirane preklapajućom i fiksnom mrežom**

	Preklapajuća mreža	Fiksna mreža
Broj ćelija kod jednotrupnog broda	≈ 2 600 000	≈ 2 100 000
Broj ćelija kod katamarana	≈ 3 500 000	≈ 2 400 000

Iz tablice 4. može se uočiti značajna razlika broja generiranih ćelija u proračunskoj domeni diskretiziranoj preklapajućom mrežom u odnosu na domenu diskretiziranu fiksnom mrežom, što će produljiti vrijeme trajanja proračuna.

#### 4.7. Fizikalni model numeričke simulacije

Na slici 10. prikazan je padajući izbornik zadanog fizikalnog modela u programskom paketu STAR-CCM+.



Slika 10. Fizikalni model viskozno strujanja

Dvofazno strujanje vode i zraka opisano je višefaznim modelom (eng. *Euler Multiphase*), dok se položaj slobodne površine prati i locira metodom udjela fluida u volumenu (eng. *Volume of fluid* - VOF). VOF metoda određuje koliki je udio pojedine faze u pojedinoj ćeliji te na taj način locira položaj slobodne površine. Zadana su fizikalna svojstva slatke vode i zraka.

Model broda u numeričkim simulacijama ima dozvoljena dva stupnja slobode gibanja, posrtanje i poniranje. Interakcija fluida i broda opisana je modelom „*Dynamic Fluid Body Interaction*“ te omogućuje određivanje kuta trima i urona/izrona broda.

#### 4.8. Zadavanje numeričkog rješavača (eng. *Solver*)

Odabran je implicitni rješavač (eng. *Implicit Unsteady*) kojemu je zadan vremenski korak prema sljedećoj relaciji:

$$\Delta t = \frac{T}{c} \quad (11)$$

gdje je  $T = \frac{L_{pp}}{v}$ , odnosno period definiran kao omjer duljine između perpendikulara (okomica) i brzine broda. Koeficijent  $c$  zadaje se ovisno o veličini vremenskog koraka koji se želi postići te za fini vremenski korak iznosi 200.

U ovom radu je provedeno pet iteracija po vremenskom koraku, dok je maksimalno vrijeme trajanja proračuna 165 s. Zadan je dodatni kriterij prekida simulacije, odnosno kada oscilacije ukupnog otpora unutar zadnjih 10 iteracija budu manje od 0,02 N. U početku numeričke simulacije model broda je fiksiran te je modelu broda nakon jedne sekunde omogućeno gibanje s dozvoljenim stupnjevima slobode. Najmanji vremenski korak je onaj pri  $Fr = 0,75$  i iznosi 0,004 s, dok je najveći pri  $Fr = 0,3$  te iznosi 0,0092 s.

## 5. ANALIZA REZULTATA

U ovom poglavlju prikazani su rezultati viskoznog strujanja oko modela jednotrupnog broda Delft 372 i katamarana s različitim razmacima između trupova. Prikazani su dobiveni rezultati ukupnog otpora i faktora interferencije za sve ispitane brzine te je analizirana razlika rezultata kod primjene fiksne i preklapajuće mreže. Također je provedena verifikacija i validacija rezultata.

### 5.1. Verifikacija rezultata

Verifikacija rezultata provedena je za tri gustoće mreže i tri vremenska koraka za jednotrupni brod i katamaran s razmakom  $H/L = 0,167$  pri  $Fr = 0,75$ . Verifikacija mreže provedena je primjenom finog vremenskog koraka, a verifikacija vremenskog koraka primjenom fine mreže. U tablici 5. dan je prikaz dobivenih rezultata numeričke nesigurnosti mreže za ukupni otpor. Gruba mreža imala je oko 0,8 milijuna ćelija, srednja mreža oko 1,75 milijuna dok je fina mreža imala oko 2,2 milijuna generiranih ćelija. U tablici 6. dan je prikaz dobivenih rezultata numeričke nesigurnosti vremenskog koraka za ukupni otpor. Vremenski koraci izračunati su prema jednadžbi (11), gdje je za grubi vremenski korak konstanta  $c = 50$ , a za srednji vremenski korak  $c = 100$ .

**Tablica 5. Određivanje numeričke nesigurnosti mreže**

	$\Phi_1, N$	$\Phi_2, N$	$\Phi_3, N$	$\varepsilon_{21}, N$	$\varepsilon_{32}, N$	$R_i$	$U_i, N$
Jednotrupni brod	36,912	37,242	36,474	0,330	-0,766	-0,431	0,383
Katamaran	80,808	80,081	78,982	-0,727	-1,099	0,664	1,800

**Tablica 6. Određivanje numeričke nesigurnosti vremenskog koraka**

	$\Phi_1, N$	$\Phi_2, N$	$\Phi_3, N$	$\varepsilon_{21}, N$	$\varepsilon_{32}, N$	$R_i$	$U_i, N$
Jednotrupni brod	36,912	36,728	38,431	-0,184	1,703	-0,106	0,852
Katamaran	80,808	78,728	78,622	-2,079	-0,106	18,909	2,186

U tablici 7. dana je nesigurnost mreže, vremenskog koraka i ukupna numerička nesigurnost. Moguće je uočiti kako je ukupna numerička nesigurnost za određivanje ukupnog otpora jednotrupnog broda i katamarana manja od 3,6%. Veća ukupna numerička nesigurnost dobivena je za određivanje ukupnog otpora katamarana, što je bilo očekivano kako je strujanje

oko katamarana znatno složenije od strujanja oko jednotrupnog broda uslijed pojave interferencije.

**Tablica 7. Numerička nesigurnost mreže, vremenskog koraka i ukupna numerička nesigurnost**

	$U_G$ , %	$U_T$ , %	$U_{SN}$ , %
Ukupni otpor jednotrupnog broda	1,038	2,308	2,531
Ukupni otpor katamarana	2,228	2,710	3,508

## 5.2. Validacija rezultata

U sljedećim tablicama prikazani su rezultati dobiveni numeričkim simulacijama i eksperimentom, gdje  $R_T$  predstavlja ukupni otpor broda. Indeks  $RDF$  odnosi se na rezultate numeričkih simulacija, a  $EXP$  označava rezultate dobivene eksperimentom. Tablica 8. prikazuje rezultate ukupnog otpora i trima za jednotrupni brod.

**Tablica 8. Usporedba ukupnog otpora i trima jednotrupnog broda s eksperimentalnim rezultatima**

$Fr$	$R_{T\_RDF}$ , N	$R_{T\_EXP}$ , N	$\tau^o_{RDF}$ , °	$\tau^o_{EXP}$ , °
0,30	5,582	6,3	-0,18	-0,10
0,35	7,537	8,5	-0,31	-0,15
0,40	10,802	12,5	-0,40	-0,25
0,45	15,341	17,5	-1,00	-0,65
0,50	19,956	22,0	-1,15	-1,05
0,75	36,912	41,0	-1,75	-1,60

Usporedbom rezultata numeričkih simulacija s eksperimentom moguće je uočiti kako najveće relativno odstupanje ukupnog otpora dobivenog numeričkom simulacijom i eksperimentom iznosi -13,6% pri  $Fr = 0,4$ , što predstavlja relativno veliko odstupanje. Budući je ispitan model malih dimenzija mjerna nesigurnost je veća zbog malih izmjerenih veličina. Tada i mala pogreška u mjerenju daje veliko relativno odstupanje. Kutovi trima podudaraju se s eksperimentalnim rezultatima pri višim  $Fr$ , dok pri onim nižim postoje određena odstupanja zbog ranije spomenutih razloga. Zbog većih iznosa kutova trima pri višim  $Fr$  relativno odstupanje numeričkih rezultata u odnosu na eksperimentalne rezultate je manje.

Tablica 9. prikazuje rezultate ukupnog otpora za katamarane s tri različita razmaka između trupova, a tablica 10. daje usporedbu kutova trima katamarana dobivenih numeričkim simulacijama i eksperimentom.

**Tablica 9. Usporedba ukupnog otpora za tri katamarana modela Delft 372 dobivenog numeričkim simulacijama i eksperimentalnim ispitivanjima**

Razmak trupova katamarana	$H/L = 0,167$		$H/L = 0,233$		$H/L = 0,300$	
$Fr$	$R_{T\_RDF}, N$	$R_{T\_EXP}, N$	$R_{T\_RDF}, N$	$R_{T\_EXP}, N$	$R_{T\_RDF}, N$	$R_{T\_EXP}, N$
0,3	12,390	12,5	12,227	12,4	12,160	12,5
0,35	16,506	17,5	14,822	15,9	14,774	15,0
0,4	23,598	23,9	24,944	25,8	25,595	26,8
0,45	39,032	42,8	39,495	42,0	37,056	40,6
0,5	53,344	57,0	50,885	53,0	46,142	50,0
0,75	80,808	87,0	73,222	80,0	74,537	82,0

Prema podacima iz tablice 9. odstupanja numeričkih od eksperimentalnih rezultata su ispod -10%, a najveće relativno odstupanje dobiveno je pri  $Fr = 0,45$  te iznosi -8,7%. Relativna odstupanja su očekivano manja od onih kod jednotrupnog broda, zbog većih iznosa mjerenih fizikalnih veličina odnosno manje mjerne nesigurnosti. Numeričke simulacije vrlo su dobro predvidjele ukupni otpor katamarana. Veća relativna odstupanja pri višim  $Fr$  vjerojatno su nastala zbog većeg dinamičkog trima kojeg fiksna mreža ne može pratiti. Stoga se može zaključiti kako je primjena preklapajuće mreže pri višim vrijednostima  $Fr$  neophodna.

Tablica 10. prikazuje kutove trima za model katamarana Delft 372 dobivenih numeričkim simulacijama i eksperimentalnim ispitivanjima za tri razmaka između trupova katamarana. Numerički dobiven kut trima pokazuje zadovoljavajuće slaganje s eksperimentalnim rezultatima. Dobivena odstupanja moguće je objasniti činjenicom da je mjerna nesigurnost izraženija zbog malih dimenzija modela. Uočeno je kako je do  $Fr = 0,35$  vrijednost kuta trima zanemariva kod svih konfiguracija katamarana što je pokazano i u [25].

**Tablica 10. Usporedba kuta trima katamarana modela Delft 372 dobivenih numeričkim simulacijama i eksperimentalnim ispitivanjima**

Razmak trupova katamarana	$H/L = 0,167$		$H/L = 0,233$		$H/L = 0,300$	
	$\tau_{RDF}^{\circ}$	$\tau_{EXP}^{\circ}$	$\tau_{RDF}^{\circ}$	$\tau_{EXP}^{\circ}$	$\tau_{RDF}^{\circ}$	$\tau_{EXP}^{\circ}$
$Fr$						
0,3	-0,20	-0,10	-0,19	-0,18	-0,23	-0,19
0,35	-0,21	-0,14	-0,15	-0,11	-0,12	-0,09
0,4	-0,38	-0,22	-0,51	-0,40	-0,55	-0,58
0,45	-1,30	-1,21	-1,38	-1,38	-1,22	-1,22
0,5	-2,24	-2,02	-1,94	-1,85	-1,68	-1,55
0,75	-2,14	-1,99	-1,76	-1,62	-1,80	-1,60

Tablica 11. prikazuje usporedbu ukupnog otpora za tri konfiguracije katamarana pri  $Fr = 0,35$  dobivenog numeričkim simulacijama uz primjenu preklapajuće mreže i eksperimentalno. Numeričkim simulacijama su dobiveni zadovoljavajući rezultati uz relativna odstupanja od 6,2%, 7,1% i 2,6%. Usporedbom ukupnog otpora dobivenog primjenom preklapajuće mreže s ukupnim otporom dobivenim primjenom fiksne mreže vidljivo je da su dobivene gotovo identične vrijednosti. Ovo je uzrokovano činjenicom da kut trima pri  $Fr = 0,35$  nije izražen te stoga prednosti primjene preklapajuće mreže nisu došle do izražaja. Prednosti primjene preklapajuće mreže došle bi do izražaja pri višim  $Fr$  gdje su izraženiji iznosi kutova trima i urona/izrona.

**Tablica 11. Usporedba ukupnog otpora za modele katamarana Delft 372 dobivenog numeričkim simulacijama uz primjenu preklapajuće mreže s eksperimentalnim rezultatima**

Razmak trupova katamarana	$H/L = 0,167$		$H/L = 0,233$		$H/L = 0,300$	
	$R_{T\_RDF}$ , N	$R_{T\_EXP}$ , N	$R_{T\_RDF}$ , N	$R_{T\_EXP}$ , N	$R_{T\_RDF}$ , N	$R_{T\_EXP}$ , N
$Fr$						
0,35	16,400	17,5	14,727	15,9	14,556	15,0

### 5.3. Validacija rezultata s drugim eksperimentom

U prethodnom potpoglavlju rezultati numeričkih simulacija uspoređeni su s rezultatima eksperimentalnih ispitivanja [1]. U ovom potpoglavlju rezultati numeričkih simulacija će biti uspoređeni s rezultatima drugih eksperimentalnih ispitivanja koji su provedeni na modelu katamarana Delft 372 samo pri jednom razmaku između trupova,  $H/L = 0,233$  [18]. Dani su i podaci za kut trima navedenog katamarana te su analizirani u nastavku.

Tablica 12. prikazuje usporedbu ukupnog otpora dobivenog numeričkim simulacijama i eksperimentalnim ispitivanjima [18]. Relativna odstupanja ukupnog otpora za ispitane  $Fr$  iznose oko -5%, dok je najveće relativno odstupanje dobiveno pri  $Fr = 0,35$  te iznosi -8,2%. Ostvarena su znatno manja relativna odstupanja od eksperimentalnih rezultata pri višim  $Fr$  nego što je to bio slučaj kod usporedbe rezultata dobivenih numeričkim simulacijama s eksperimentom [1] iz potpoglavlja 5.2.

**Tablica 12. Usporedba ukupnog otpora katamarana s razmakom između trupova  $H/L = 0,233$  dobivenog numeričkim simulacijama s eksperimentalnim rezultatima**

Razmak trupova katamarana	$H/L = 0,233$	
$Fr$	$R_{T\_RDF}, N$	$R_{T\_EXP}, N$
0,3	12,227	12,77
0,35	14,822	16,14
0,4	24,944	26,23
0,45	39,495	41,75
0,5	50,885	52,79
0,75	73,222	74,71

Uspoređen je i kut trima katamarana gdje je uočeno bolje podudaranje kuta trima pri višim  $Fr$ , izuzev  $Fr = 0,75$ , nego pri nižim  $Fr$  kod kojih je kut trima mali te je prisutna veća mjerna nesigurnost. Isto tako vidljiva su veća odstupanja kutova trima između dva eksperimenta pri  $Fr = 0,3 ; 0,35 ; i 0,75$ .



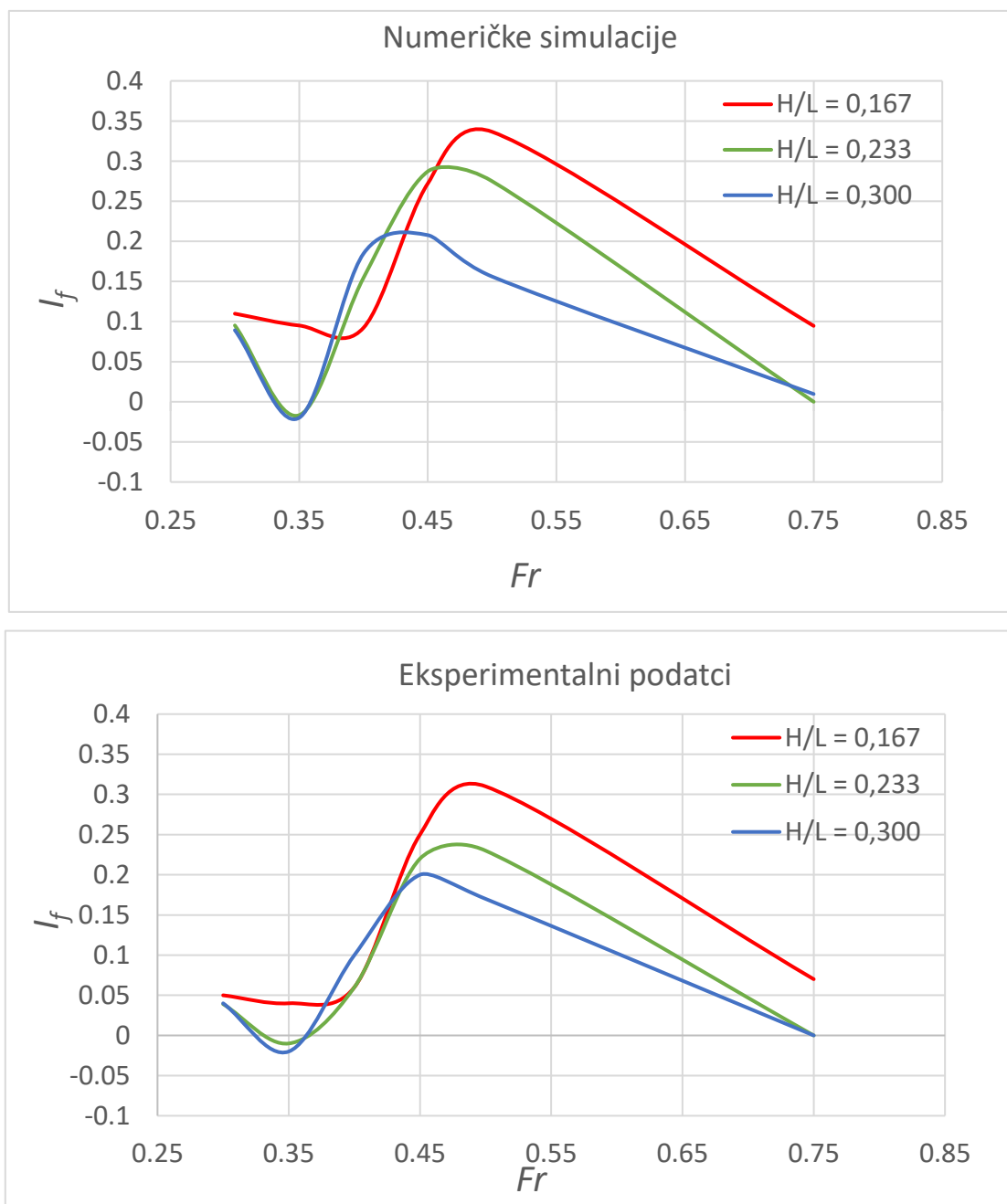
**Tablica 13. Usporedba kuta trima katamarana s razmakom  $H/L = 0,233$  dobivenog numeričkim simulacijama i eksperimentalnim ispitivanjima**

Razmak trupova katamarana	$H/L = 0,233$	
$Fr$	$\tau^o_{RDF}, \circ$	$\tau^o_{EXP}, \circ$
0,3	-0,19	-0,091
0,35	-0,15	-0,050
0,4	-0,51	-0,480
0,45	-1,37	-1,390
0,5	-1,94	-1,990
0,75	-1,68	-1,350

#### 5.4. Faktor interferencije

Faktor interferencije računa se prema jednadžbi (3). U slučaju da je faktor interferencije manji od nule ostvarena je povoljna interferencija te katamaran ima manji ukupni otpor od dvostruke vrijednosti ukupnog otpora jednotrupnog broda pri zadanoj brzini plovidbe [26]. Na slici 11. prikazana je usporedba trendova krivulja faktora interferencije u ovisnosti o Froudeovom broju dobivenih primjenom računalnih simulacija i eksperimentalno [1].

Usporedbom dijagrama sa slike 11., koji prikazuje ovisnost faktora interferencije o  $Fr$  dobivenu numeričkim simulacijama i eksperimentalno za tri razmaka između trupova katamarana, moguće je uočiti kako je ostvareno zadovoljavajuće slaganje rezultata. Uočena je pojava povoljne interferencije pri  $Fr = 0,35$  za dva razmaka između trupova katamarana to jest za  $H/L = 0,233$  i  $H/L = 0,300$ , što je dobiveno i eksperimentalnim ispitivanjima [1].



Slika 11. Ovisnost faktora interferencije o  $Fr$  dobiven numeričkim simulacijama (gore) i eksperimentalno (dolje)

Nadalje, uspoređeni su rezultati numeričkih simulacija provedenih primjenom fiksne i preklapajuće mreže za navedene razmake između trupova katamarana kod kojih je prisutna povoljna interferencija. Dobivene numeričke vrijednosti povoljnih faktora interferencije primjenom fiksne i preklapajuće mreže dane su u tablici 14.

**Tablica 14. Vrijednosti faktora interferencije pri  $Fr = 0,35$** 

$Fr = 0,35$	$H/L = 0,233$	$H/L = 0,300$
Fiksna mreža	-0,017	-0,020
Preklapajuća mreža	-0,013	-0,025
Eksperiment	-0,012	-0,021

Iz tablice 14. može se zaključiti da su vrijednosti faktora interferencije dobivene numeričkim simulacijama primjenom fiksne i preklapajuće mreže pri  $Fr = 0,35$  gotovo identične te imaju malo relativno odstupanje od eksperimentalnih vrijednosti iz čega se može zaključiti kako je obje mreže moguće primijeniti za pronalaženje povoljnog faktora interferencije pri nižim  $Fr$ .

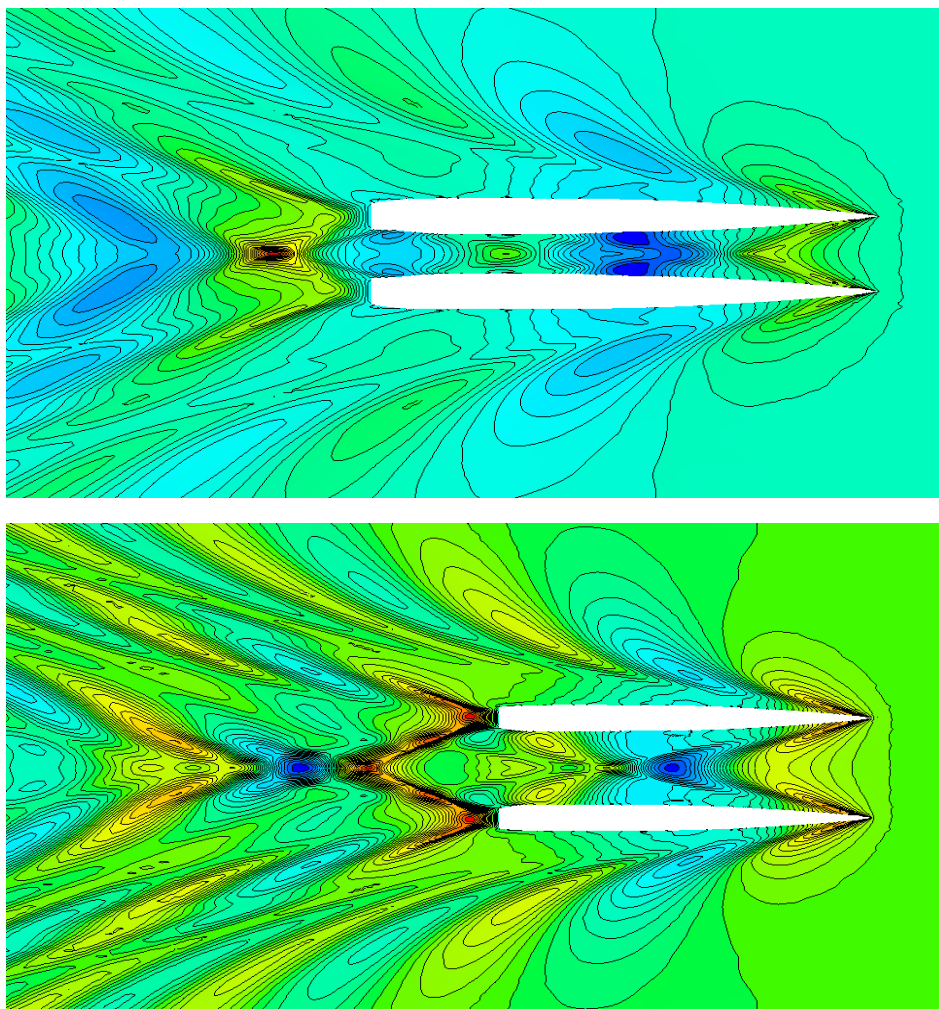
Bitna razlika između fiksne i preklapajuće mreže je zahtjevnost proračuna i vrijeme trajanja numeričke simulacije. Dok su numeričke simulacije s fiksnom mrežom prosječno trajale 24 sata na osobnom računalu (Intel(R) Core(TM) i7-7500U; RAM 16 GB), one s preklapajućom mrežom prosječno su trajale 72 sata. Budući je vrijeme ključan faktor u postupku preliminarnog projekta katamarana, može se zaključiti kako su numeričke simulacije uz primjenu fiksne mreže adekvatan alat za određivanje optimalnog razmaka između trupova katamarana pri nižim  $Fr$ .

### 5.5. Slike valova

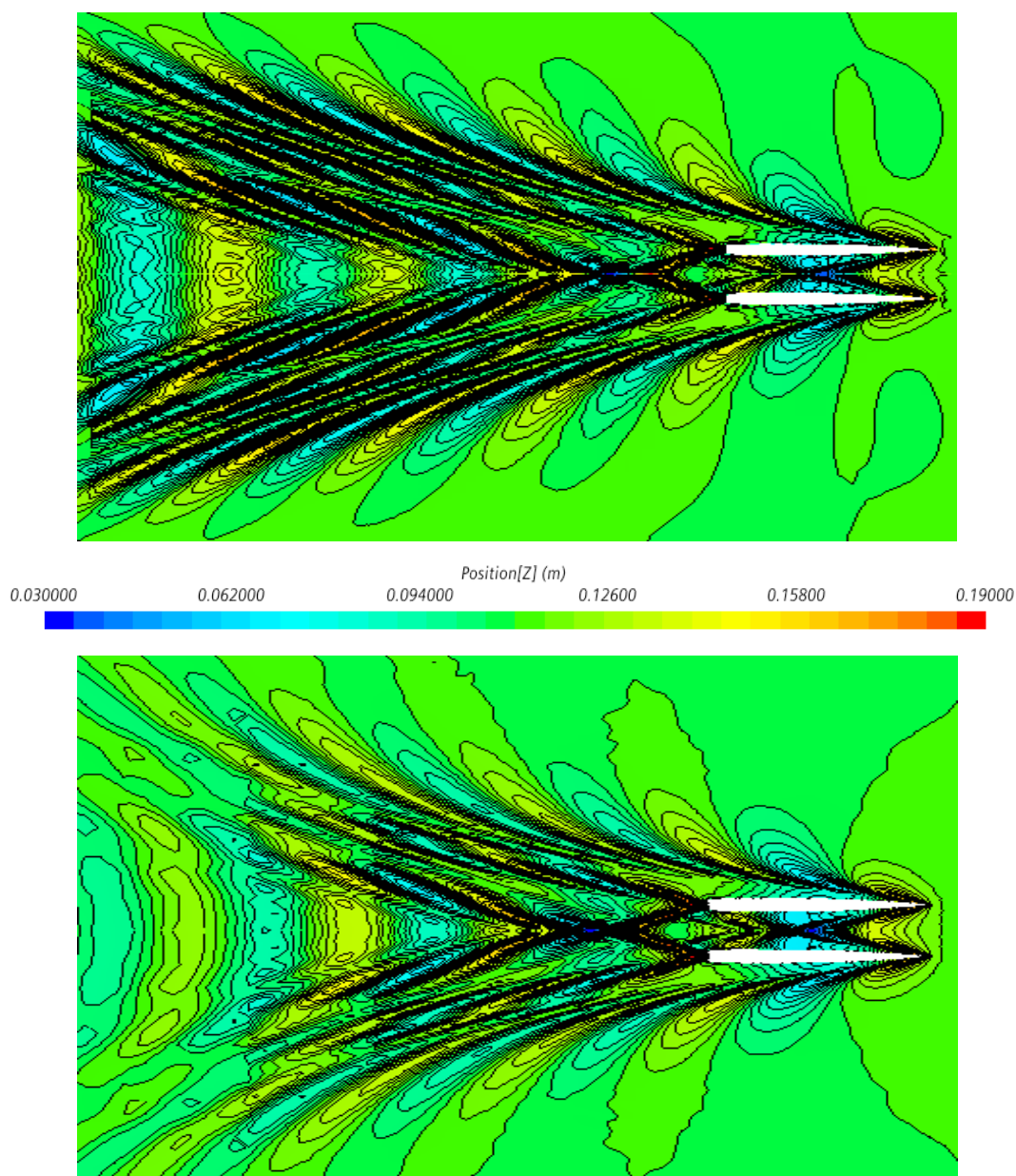
Interferencija valova javlja se između trupova katamarana te njen učinak može biti povoljan ili nepovoljan. U ovom potpoglavlju uspoređene su slike valova katamarana s razmakom između trupova  $H/L = 0,167$  pri  $Fr = 0,5$  i katamarana s razmakom između trupova  $H/L = 0,300$  pri  $Fr = 0,35$ .

Interferencija valova između trupova katamarana jasno je vidljiva kao formiranje brijegova i dolova u prostoru između trupova katamarana. Formiranje brijegova i dolova uzrokuje različitu oplakanu površinu unutarnjih i vanjskih dijelova trupova katamarana. Uočena interferencija utjecat će na ukupni otpor katamarana zbog različitih oplakanih površina uzrokovanih valovima te promjene brzine strujanja između trupova katamarana. Usporedbom slika valova prikazanih na slici 12. može se uočiti kako su generirani brijegovi i dolovi u području između trupova katamarana sa širim razmakom između trupova katamarana pomaknuti prema krmi broda u odnosu na generirane brijegove i dolove kod katamarana s užim razmakom između trupova. Kako valni sustavi kod šireg razmaka između trupova dijelom izlaze izvan prostora između

trupova katamarana smanjuje se njihov utjecaj na ukupni otpor katamarana. Stoga je povoljna interferencija dobivena kod šireg razmaka između trupova katamarana, a nepovoljna pri užem razmaku između trupova katamarana.



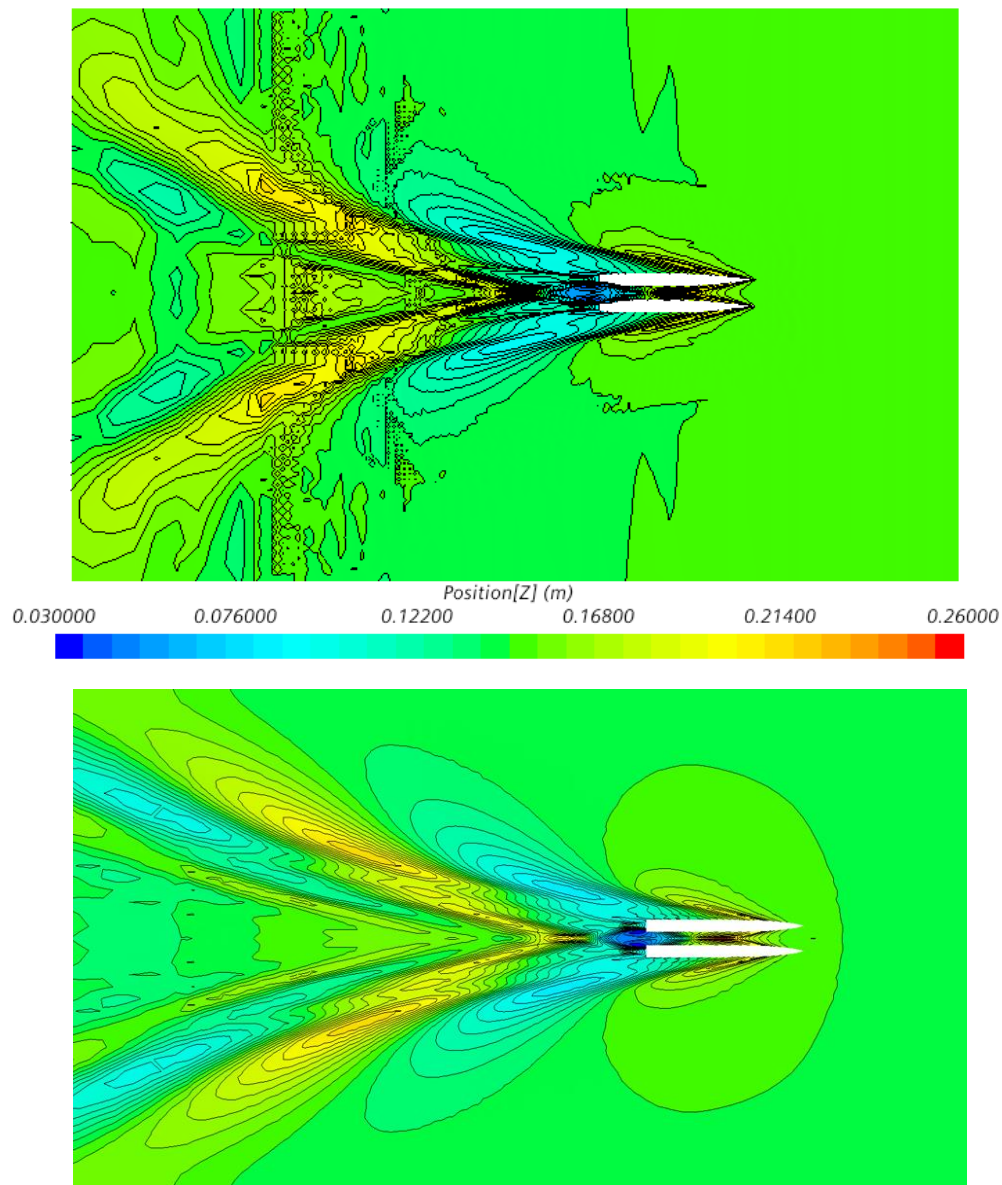
**Slika 12. Slika valova za katamaran s razmakom između tupova  $H/L = 0,167$  pri  $Fr = 0,5$  (gore) i  $H/L = 0,300$  pri  $Fr = 0,35$  (dolje)**



**Slika 13. Slika valova dobivena primjenom fiksne (dolje) i preklapajuće mreže (gore) za katamaran s razmakom između trupova  $H/L = 0,167$  pri  $Fr = 0,35$**

Usporedba slike valova dobivene primjenom fiksne i preklapajuće mreže prikazana je na slici 13. Numeričke simulacije su provedene za katamaran s razmakom između trupova  $H/L = 0,167$  pri  $Fr = 0,35$ , gdje se može uočiti kako je numerička simulacija uz primjenu preklapajuće mreže dala realniji prikaz slike valova. Ovaj utjecaj bio bi još izraženiji pri višim  $Fr$ , to jest numeričke simulacije primjenom preklapajuće mreže dale bi znatno realniju sliku valova. U tu svrhu provedena je jedna dodatna numerička simulacija primjenom preklapajuće mreže za katamaran

s razmakom između trupova  $H/L = 0,167$  pri  $Fr = 0,75$ . Na slici 14. dana je usporedba slike valova dobivene numeričkim simulacijama primjenom fiksne i preklapajuće mreže.

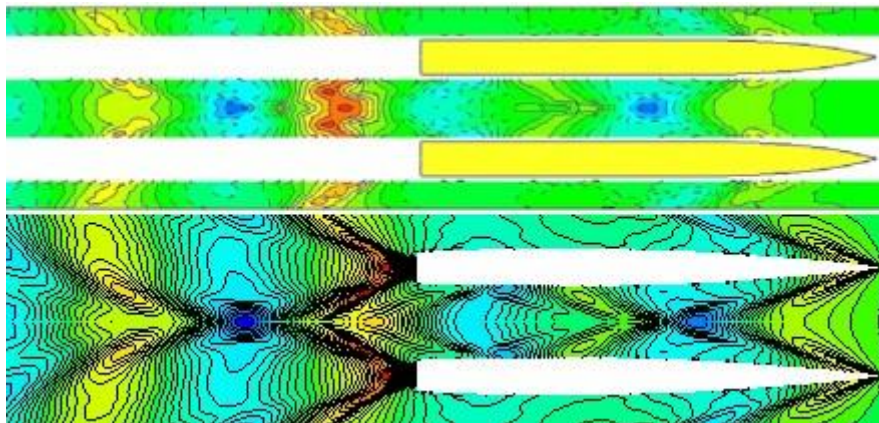


**Slika 14. Slika valova dobivena primjenom fiksne (gore) i preklapajuće mreže (dolje) za katamaran s razmakom između trupova  $H/L = 0,167$  pri  $Fr = 0,75$**

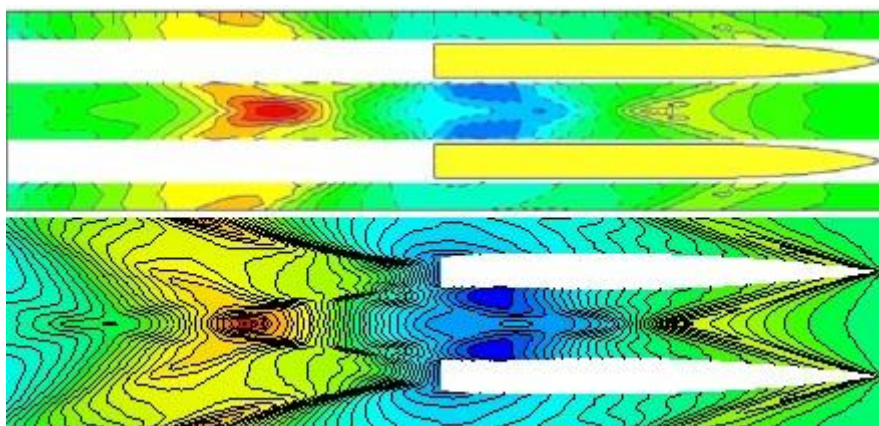
Pri nižim i srednjim  $Fr$  numeričke simulacije primjenom fiksne mreže daju realističan prikaz slike valova. Ovo se može objasniti činjenicom da katamaran ima male kutove trima za koje fiksna mreža dovoljno točno diskretizira proračunsku domenu. Pri višim  $Fr$  kut trima većega je iznosa te će fiksna mreža dati nerealnu sliku valova, stoga je potrebno koristiti preklapajuću mrežu.



Slike 15. i 16. prikazuju usporedbu slika valova dobivenih numeričkim simulacijama i eksperimentalnim ispitivanjima [1] pri razmaku između trupova katamarana  $H/L = 0,233$  za dvije brzine koje odgovaraju  $Fr = 0,3$  i  $Fr = 0,5$ . Moguće je uočiti vrlo dobra podudaranja slika valova te se može zaključiti da je računalna dinamika fluida neizostavan alat u području hidrodinamike plovnih objekata. Slika valova u području između trupova katamarana znatno ovisi o  $Fr$  [27].



**Slika 15.** Usporedba slika valova dobivenih numeričkim simulacijama (dolje) i eksperimentalno (gore) za katamaran s razmakom između trupova  $H/L = 0,233$  pri  $Fr = 0,3$



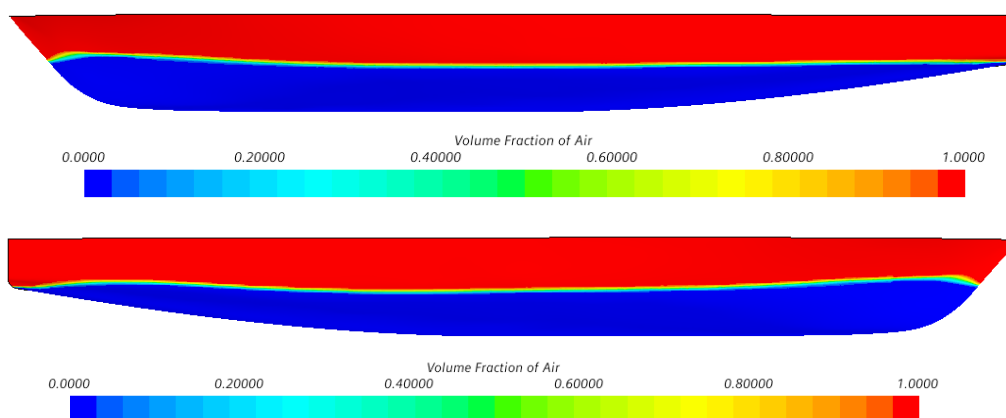
**Slika 16.** Usporedba slika valova dobivenih numeričkim simulacijama (dolje) i eksperimentalno (gore) za katamaran s razmakom između trupova  $H/L = 0,233$  pri  $Fr = 0,5$

### 5.6. Položaj slobodne površine i raspodjela tangencijalnih naprezanje

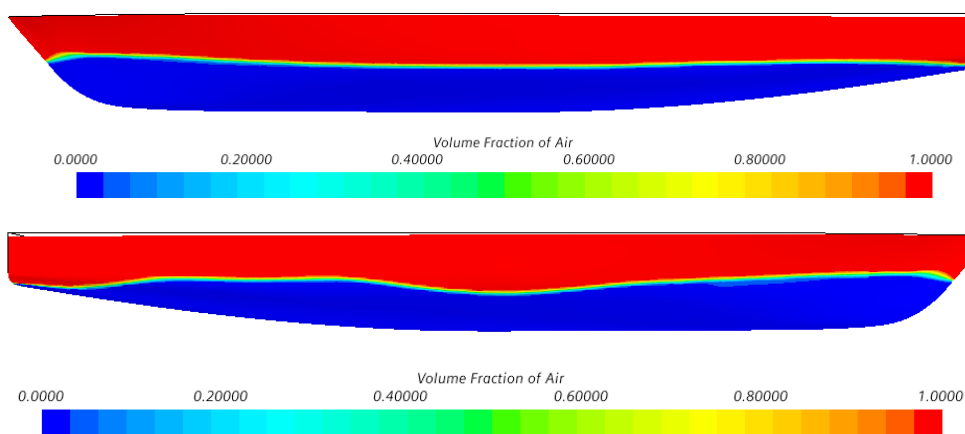
Porast ukupnog otpora uslijed pojave interferencije vezan je uz generirane valove između trupova katamarana. Generirani valovi određuju položaj slobodne površine, koji se razlikuje na unutarnjem i vanjskom dijelu trupa katamarana. Na slikama 17. i 18. dana je usporedba položaja slobodne površine na unutarnjem i vanjskom dijelu trupova za katamarane s razmacima između

trupova  $H/L = 0,3$  i  $H/L = 0,167$  pri  $Fr = 0,35$ . Važno je naglasiti kako katamaran s razmakom između trupova  $H/L = 0,3$  pri  $Fr = 0,35$  ima povoljnu interferenciju dok katamaran s razmakom između trupova  $H/L = 0,167$  pri istom  $Fr$  ima nepovoljnu interferenciju.

Iz slika 17. i 18. moguće je uočiti kako obje konfiguracije katamarana imaju jednake položaje slobodnih površina na vanjskom dijelu trupa, dok se položaji slobodnih površina na unutarnjim dijelovima trupova veoma razlikuju.



**Slika 17. Prikaz slobodne površine po unutarnjem (dolje) i vanjskom dijelu (gore) trupa katamarana s razmakom između trupova  $H/L = 0,3$  pri  $Fr = 0,35$**

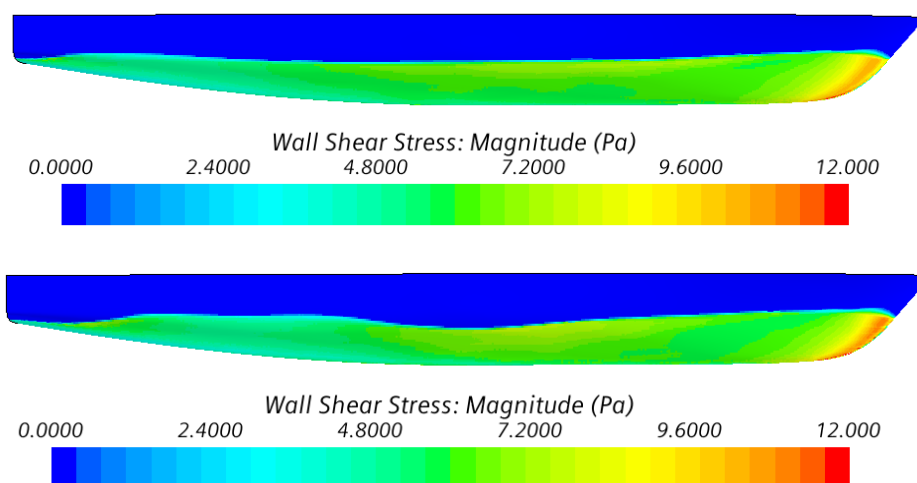


**Slika 18. Prikaz slobodne površine po unutarnjem (dolje) i vanjskom dijelu (gore) trupa katamarana s razmakom između trupova  $H/L = 0,167$  pri  $Fr = 0,35$**

Za katamaran s razmakom između trupova  $H/L = 0,167$  položaj slobodne površine na unutarnjem dijelu trupa značajnije je promijenjen uslijed interferencije valova u odnosu na katamaran s razmakom između trupova  $H/L = 0,3$ . Značajnija promjena položaja slobodne



površine uzrokovat će veći otpor valova, što za posljedicu ima nepovoljnu interferenciju valova. Promjena položaja slobodne površine po trupu katamarana te brzine strujanja u prostoru između trupova katamarana direktno je povezana s raspodjelom hidrodinamičkog tlaka i tangencijalnog naprezanja na trupu katamarana.

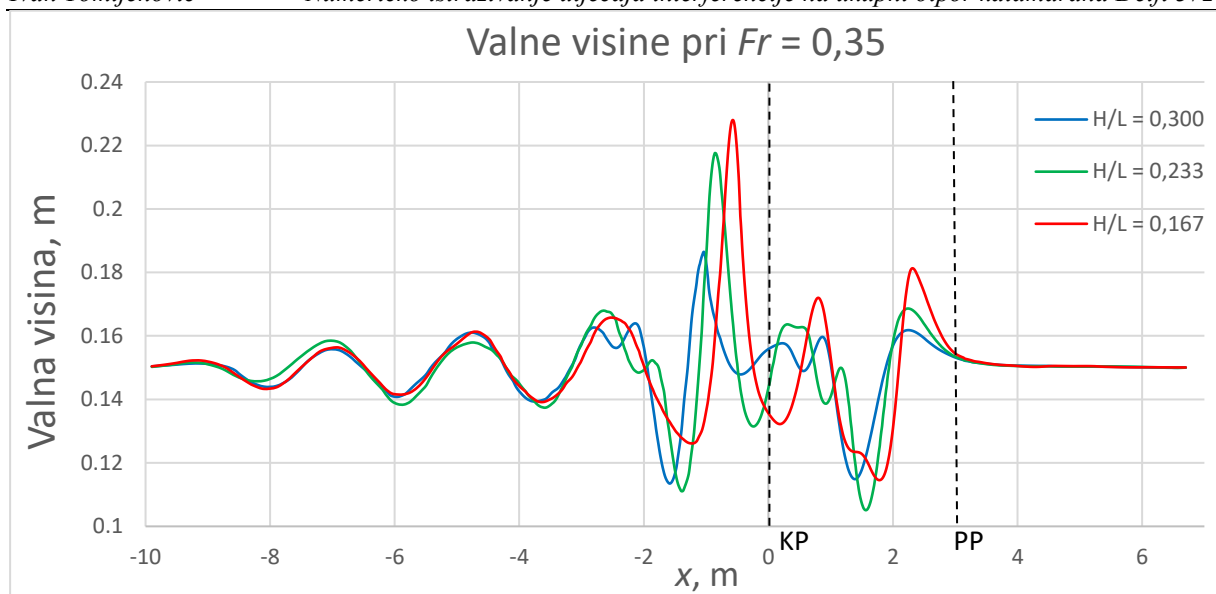


**Slika 19. Prikaz tangencijalnog naprezanja po unutarnjem dijelu trupa katamarana s razmakom između trupova  $H/L = 0,300$  (gore) i  $H/L = 0,167$  (dolje) pri  $Fr = 0,35$**

Na slici 19. prikazana je raspodjela naprezanja po unutrašnjem dijelu trupova katamarana s razmakom između trupova  $H/L = 0,300$  i  $H/L = 0,167$  pri  $Fr = 0,35$ . Prema slici 19. katamaran s razmakom između trupova  $H/L = 0,167$  ima veće tangencijalno naprezanje u području valnog dola na unutarnjem dijelu trupa, što uzrokuje veći ukupni otpor te nepovoljnu interferenciju valova u odnosu na katamaran s razmakom između trupova  $H/L = 0,300$ .

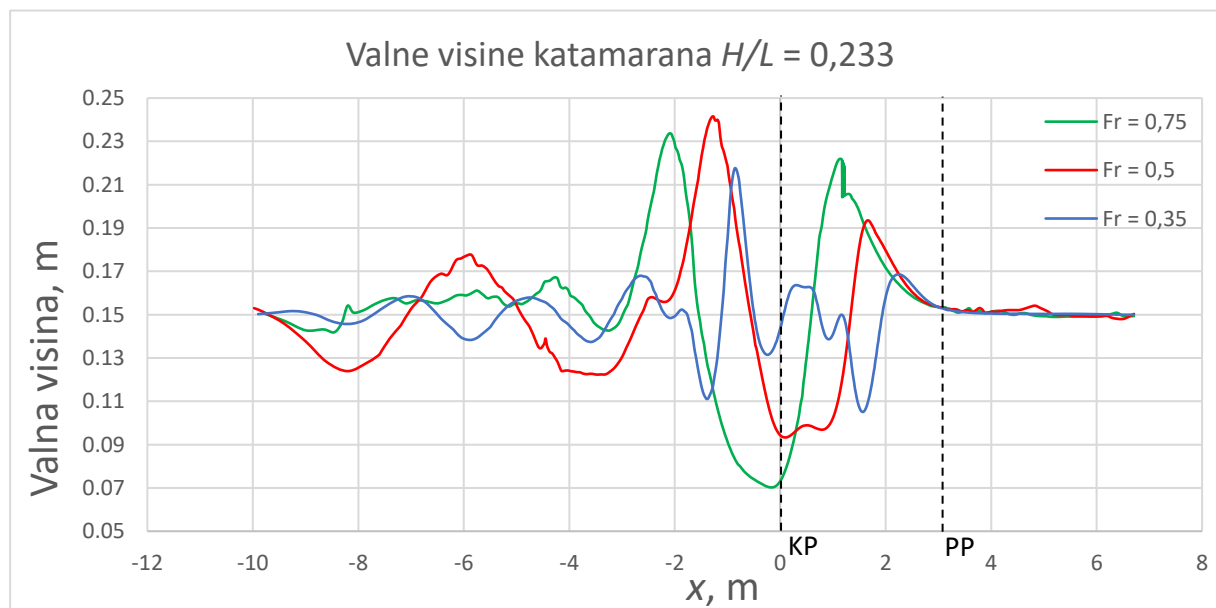
### 5.7. Profil valova u uzdužnoj simetralnoj ravnini

U ovom potpoglavlju analizirani su profili valova u uzdužnoj simetralnoj ravnini pri  $Fr = 0,35$ , gdje je uočena povoljna interferencija za katamarane s razmakom između trupova  $H/L = 0,300$  i  $H/L = 0,233$ . Već je spomenuto kako će uslijed interferencije valova slika valova između trupova katamarana biti značajno različita od slike valova u vanjskom području oko katamarana. Valna visina generiranih valova između trupova katamarana može povećati ili smanjiti otpor valova [28]. Na slici 20. prikazan je profil valova u uzdužnoj simetralnoj ravnini pri  $Fr = 0,35$  za tri razmaka između trupova katamarana.



**Slika 20. Profil valova u uzdužnoj simetralnoj ravnini za tri razmaka između trupova katamarana pri  $Fr = 0,35$**

Na slici 20. crtkana crna linija obilježava položaj krmenog (KP) i pramčanog (PP) perpendikulara broda. Valne visine najveće su kod katamarana s razmakom između trupova  $H/L = 0,167$ , gdje je kako je ranije izneseno, ostvarena nepovoljna interferencija. Moguće je uočiti manje valne visine za katamaran s razmakom između trupova  $H/L = 0,233$ , dok su najmanje valne visine dobivene pri najvećem razmaku između trupova katamarana  $H/L = 0,300$ , gdje je ostvarena najpovoljnija interferencija u ovom numeričkom istraživanju. Budući otpor valova ovisi o kvadratu visine valova porastom visine vala otpor valova značajno raste, a time i ukupni otpor katamarana, što u konačnici rezultira nepovoljnom interferencijom.



**Slika 21. Profil valova u uzdužnoj simetralnoj ravnini za katamaran s razmakom između trupova  $H/L = 0,233$  pri tri  $Fr$**

Na slici 21. prikazani su profili valova u uzdužnoj simetralnoj ravnini za katamaran s razmakom između trupova  $H/L = 0,233$  za tri  $Fr$ . Kod jednutrupnog broda povećanjem brzine plovidbe povećavaju se i valne visine u uzdužnoj simetralnoj ravnini, stoga porast brzine uzrokuje porast otpora valova. Moguće je uočiti kako je visina valnog brijega pri  $Fr = 0,5$  iza krme broda veća od visine valnog brijega pri  $Fr = 0,75$ . Ovo je uzrokovano nepovoljnom interferencijom valova pri  $Fr = 0,5$ , gdje je dobivena najveća vrijednost faktora interferencije što je pokazano i u [29]. Važno je napomenuti kako su profili valova prikazani na slici 21. dobiveni primjenom numeričkih simulacija s fiksnom mrežom pri različitim  $Fr$ . Na slici 21. moguće je uočiti kako je profil valova u uzdužnoj simetralnoj ravnini pri  $Fr = 0,35$  kontinuiran, dok pri višim  $Fr$  krivulje profila valova imaju više lokalnih minimuma i maksimuma. Ovo se može pripisati primjeni fiksne mreže koja daje realnu sliku valova pri nižim  $Fr$ , dok pri višim  $Fr$  fiksna mreža ne daje realnu sliku valova, Slika 14.

### 5.8. Usporedba trima dobivenog numeričkim simulacijama primjenom fiksne i preklapajuće mreže

Valovi interferiraju između trupova katamarana te svojim djelovanjem pridonose povećanju trima i ukupnog otpora katamarana [30]. Pri  $Fr = 0,35$  uočena je povoljna interferencija kod katamarana s razmakom između trupova  $H/L = 0,300$  i  $H/L = 0,233$ , stoga su valovi u prostoru između trupova katamarana manji kao i kut trima broda u usporedbi s katamaranom s razmakom između trupova  $H/L = 0,167$ , gdje je ostvarena nepovoljna interferencija. Fiksna mreža ne može poput preklapajuće mreže pratiti dinamički kut trima broda koji se javlja pri višim  $Fr$ , dok pri manjim brzinama vrlo dobro određuje kut trima.

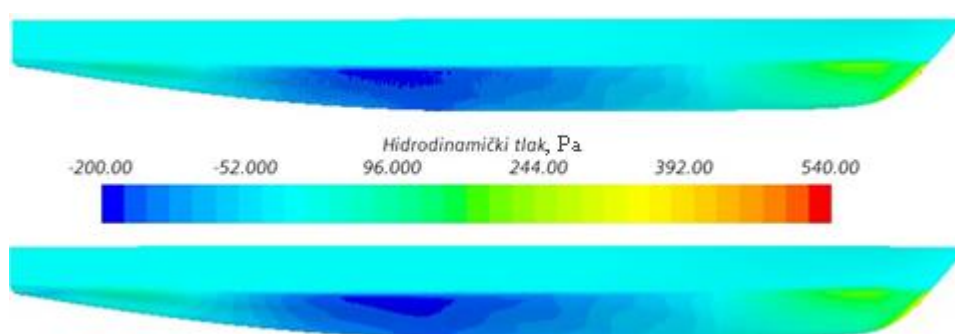
**Tablica 15. Usporedba kuta trima dobivenog numeričkim simulacijama za katamarane s različitim razmacima između trupova pri  $Fr = 0,35$  primjenom fiksne i preklapajuće mreže**

$Fr = 0,35$	$H/L = 0,167$	$H/L = 0,233$	$H/L = 0,300$
Kut trima, fiksna mreža, °	-0,21	-0,15	-0,12
Kut trima, preklapajuća mreža, °	-0,20	-0,14	-0,10

U tablici 15. dana je usporedba kuta trima dobivenog numeričkim simulacijama za katamarane s različitim razmacima između trupova pri  $Fr = 0,35$  primjenom fiksne i preklapajuće mreže.

Moguće je uočiti vrlo dobro podudaranje rezultata numeričkih simulacija s fiksnom i preklapajućom mrežom koja prati dinamički trim broda. Ovo je moguće uočiti na slici 22. gdje je prikazana raspodjela hidrodinamičkog tlaka po unutarnjem dijelu trupa katamarana s razmakom između trupova  $H/L = 0,300$  primjenom fiksne i preklapajuće mreže.

Budući je raspodjela tlaka, koja uzrokuje trim broda, dobivena primjenom fiksne i preklapajuće mreže gotovo jednaka stoga su i kutovi trima dobiveni primjenom fiksne i preklapajuće mreže gotovo identični.



**Slika 22. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka po unutarnjem dijelu trupa katamarana s razmakom između trupova  $H/L = 0,300$  dobivena primjenom fiksne (gore) i preklapajuće (dolje) mreže**

## 6. ZAKLJUČAK

U sklopu ovog rada provedene su numeričke simulacije pokusa otpora jednotrupnog broda i katamarana za tri različita razmaka između trupova. Numeričke simulacije provedene su primjenom fiksne mreže pri šest  $Fr$  te primjenom preklapajuće mreže pri  $Fr = 0,35$ , gdje je dobivena povoljna interferencija. Uz to provedena je i numerička simulacija primjenom preklapajuće mreže pri najvišem  $Fr$  kako bi se pokazala prednost preklapajuće nad fiksnom mrežom za dobivanje realne slike valova.

Prvenstveno je provedena verifikacija rezultata te je proračunata ukupna numerička nesigurnost u određivanju ukupnog otpora jednotrupnog broda i katamarana s razmakom između trupova  $H/L = 0,167$ . Dobiveni rezultati ukazuju na veću ukupnu numeričku nesigurnost pri određivanju ukupnog otpora katamarana, što je bilo i očekivano s obzirom da je strujanje oko katamarana znatno složenije od strujanja oko jednotrupnog broda uslijed pojave interferencije. Unatoč navedenom, ukupna numerička nesigurnost u određivanju ukupnog otpora katamarana je ispod 3,6%.

Validacija rezultata provedena je usporedbom numeričkih rezultata s eksperimentalnim rezultatima [1] te su dobivena relativna odstupanja manja od -10%. Također, uspoređeni su dobiveni faktori interferencije za pojedine konfiguracije katamarana te je zaključeno kako trend krivulje faktora interferencije u ovisnosti o  $Fr$  dobivene numeričkim simulacijama prati trend krivulje dobivene eksperimentalnim ispitivanjima.

Povoljna interferencija dobivena je pri  $Fr = 0,35$  za katamarane s razmakom između trupova  $H/L = 0,233$  i  $H/L = 0,300$ . Pri ovom  $Fr$  provedene su numeričke simulacije primjenom preklapajuće mreže te su dobiveni gotovo jednaki faktori interferencije kao i kod numeričkih simulacija primjenom fiksne mreže. Zaključeno je kako se faktor interferencije pri srednjim i nižim  $Fr$  vrlo dobro može odrediti numeričkim simulacijama primjenom fiksne mreže. Važno je naglasiti kako primjena preklapajuće mreže povećava zahtjevnost proračuna te produljuje vrijeme trajanja simulacije. Stoga je zaključeno kako su numeričke simulacije uz primjenu fiksne mreže adekvatan alat za određivanje optimalnog razmaka između trupova katamarana pri nižim  $Fr$ .

Valna interferencija u prostoru između trupova katamarana vidljiva je na slikama valova, gdje formirani brijegovi i dolovi mijenjaju oplakanu površinu trupa katamarana kao i brzinu strujanja između trupova, što u konačnici povećava ukupni otpor katamarana. Utjecaj

interferencije analiziran je i praćenjem položaja slobodne površine, koji se značajno mijenja na unutarnjem dijelu trupova katamarana.

Analizom profila valova u uzdužnoj simetralnoj ravnini katamarana s razmakom između trupova  $H/L = 0,233$  uočeno je kako je pri nižem  $Fr$  dobiven veći valni brijeg iza krme broda u odnosu na valni brijeg pri višem  $Fr$ . Važno je naglasiti kako ova pojava nije moguća kod jednorupnog broda te je uzrokovana nepovoljnom interferencijom valova pri nižem  $Fr$ , gdje je dobivena najveća vrijednost faktora interferencije.

Preklapajuća mreža sastoji se od pozadinske i preklapajuće regije, koja prati poniranje i dinamički trim broda zbog čega je adekvatna za numeričke simulacije pri značajnijim gibanjima broda. Preklapajuća mreža daje realniju sliku valova pri  $Fr = 0,75$ , dok se pri srednjim i nižim  $Fr$  slika valova može kvalitetno opisati i fiksnom mrežom.

U konačnici prije provođenja numeričkih simulacija potrebno je razmotriti problem koji se analizira te prema njemu odabrati način diskretizacije proračunske domene s ciljem uštede zahtijevanog proračunskog vremena i računalnih resursa. Tako je numeričkim simulacijama uz primjenu fiksne mreže moguće analizirati razne probleme brodske hidrodinamike kada gibanje broda nije značajno. U ovom radu je pokazano kako je numeričkim simulacijama primjenom fiksne mreže moguće odrediti optimalan razmak između trupova u svrhu određivanja povoljne interferencije pri srednjim i nižim vrijednostima  $Fr$ .

**ZAHVALE**

Zahvaljujem se mentorici prof. dr. sc. Nastii Degiuli i komentoru dr. sc. Andrei Farkasu na pruženoj prilici za pisanje rada i ustupljenim računalnim resursima za provođenje numeričkih simulacija u sklopu ovog numeričkog istraživanja. Također se zahvaljujem dr. sc. Ivani Martić na pruženoj pomoći.

**LITERATURA**

- [1] Broglia, R., Jacob, B., Zaghi, S., Stern, F., & Olivieri, A. (2014). Experimental investigation of interference effects for high-speed catamarans. *Ocean Engineering*, 76, 75-85.
- [2] Utama, K. A. P., Jamaluddin, A., & Aryawan, W. D. (2012). Experimental investigation into the drag interference of symmetrical and asymmetrical staggered and unstaggered catamarans. *Journal of Ocean Technology*, 7(1).
- [3] He, J., Zhang, C., Zhu, Y., Zou, L., Li, W., & Noblesse, F. (2016). Interference effects on the Kelvin wake of a catamaran represented via a hull-surface distribution of sources. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 56, 1-12.
- [4] Jamaluddin, A., Utama, I. K. A. P., Widodo, B., & Molland, A. F. (2013). Experimental and numerical study of the resistance component interactions of catamarans. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 227(1), 51-60.
- [5] Insel, M., & Molland, A. F. (1992). An investigation into the resistance components of high speed displacement catamarans.
- [6] Broglia, R., Zaghi, S., & Di Mascio, A. (2011). Numerical simulation of interference effects for a high-speed catamaran. *Journal of marine science and technology*, 16(3), 254-269.
- [7] Farkas, A., Degiuli, N., & Martić, I. (2017). Numerical investigation into the interaction of resistance components for a series 60 catamaran. *Ocean engineering*, 146, 151-169.
- [8] Zha, R. S., Ye, H. X., Shen, Z. R., & Wan, D. C. (2015). Numerical computations of resistance of high speed catamaran in calm water. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 26(6), 930-938.
- [9] Zaghi, S., Broglia, R., & Di Mascio, A. (2011). Analysis of the interference effects for high-speed catamarans by model tests and numerical simulations. *Ocean Engineering*, 38(17-18), 2110-2122.
- [10] Haase, M., Davidson, G., Thomas, G., Binns, J., & Bose, N. (2013). A practical design approach including resistance predictions for medium-speed catamarans. *Ship Technology Research*, 60(1), 4-12.
- [11] Tomljenović, I. (2022). Numeričko istraživanje pojave interferencije kod katamarana, Završni rad, University of Zagreb. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture.



- [12] Sukas, Ö. F., & Gökçe, M. K. (2016). Prediction of Hydrodynamic Aspects of a Catamaran Using Overset Grid Design. In Thirteenth International Conference on Marine Sciences and Technologies Black Sea.
- [13] Doğrul, A., Kahramanoğlu, E., & Çakıcı, F. (2021). Numerical prediction of interference factor in motions and added resistance for Delft catamaran 372. *Ocean Engineering*, 223, 108687.
- [14] Islam, H., & Akimoto, H. (2016, July). Prediction of ship resistance in Head Waves Using RaNS based solver. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1754, No. 1, p. 040011). AIP Publishing LLC.
- [15] Virag, Z., Džijan, I., (2018). *Mehanika fluida II.*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.
- [16] Molland, A. F., Turnock, S. R., & Hudson, D. A. (2011). Components of Hull resistance. *Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Propulsive Power*. Cambridge University Press, Cambridge, 12-68.
- [17] ITTC (2008). Recommended Procedures and Guidelines: Uncertainty Analysis in CFD Verification and Validation Methodology and Procedures.
- [18] Veer, R. V. T. (1998). Experimental results of motions, hydrodynamic coefficients and wave loads of the 372 catamaran model. TUDelft, Faculty of Marine Technology, Ship Hydromechanics Laboratory Report 1129, in co-orporation with MARIN at wageningen.
- [19] Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA journal*, 32(8), 1598-1605.
- [20] Demirel, Y. K., Khorasanchi, M., Turan, O., Incecik, A., & Schultz, M. P. (2014). A CFD model for the frictional resistance prediction of antifouling coatings. *Ocean Engineering*, 89, 21-31.
- [21] ITTC (2011). Recommended Procedures and Guidelines - Practical Guidelines for Ship CFD Applications.
- [22] STAR-CCM+, Tutorials/Tutorial Guide/Motion/ Marine Resistance rediction: KCS Hull with a Rudder.
- [23] Virag, Z., Džijan, I. (2014). *Računalna dinamika fluida*, Interna skripta, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.

- [24] Degiuli, N., Farkas, A., Martić, I., Zeman, I., Ruggiero, V., & Vasiljević, V. (2021). Numerical and experimental assessment of the total resistance of a yacht. *Brodogradnja*, 72(3), 61-80.
- [25] He, W., Castiglione, T., Kandasamy, M., & Stern, F. (2015). Numerical analysis of the interference effects on resistance, sinkage and trim of a fast catamaran. *Journal of Marine Science and Technology*, 20(2), 292-308.
- [26] Farkas, A., Degiuli, N., & Martić, I. (2017). Numerical assessment of interference resistance for a series 60 catamaran. In *MARINE VII: proceedings of the VII International Conference on Computational Methods in Marine Engineering* (pp. 1016-1027). CIMNE.
- [27] Souto-Iglesias, A., Zamora-Rodríguez, R., Fernández-Gutiérrez, D., & Pérez-Rojas, L. (2007). Analysis of the wave system of a catamaran for CFD validation. *Experiments in fluids*, 42(2), 321-332.
- [28] Degiuli, N., Werner, A., & Doliner, Z. (2003). Comparison of experimental methods for determining wave pattern resistance of a trimaran based on wave measurements in longitudinal cuts. *International shipbuilding progress*, 50(1-2), 57-87.
- [29] Zaghi, S., Broglia, R., & Di Mascio, A. (2010). Experimental and numerical investigations on fast catamarans interference effects. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 22(5), 528-533.
- [30] Souto-Iglesias, A., Fernández-Gutiérrez, D., & Pérez-Rojas, L. (2012). Experimental assessment of interference resistance for a Series 60 catamaran in free and fixed trim-sinkage conditions. *Ocean Engineering*, 53, 38-47.

**SAŽETAK**

Tema ovoga rada je numeričko istraživanje pojave interferencije kod katamarana Delft 372 primjenom računalne dinamike fluida (RDF) unutar programskog paketa STAR – CCM+. Matematički model tvore Reynoldsove osrednjene Navier – Stokesove jednadžbe (eng. *Reynolds Averaged Navier Stokes Equations* – RANSE) i  $k - \omega$  SST (eng. *Shear Stress Transport*) model turbulencije. U radu je korišten nestacionarni trodimenzijski model viskoznog strujanja, dok je položaj slobodne površine određen metodom udjela fluida u volumenu (eng. *Volume of fluid* – VOF). Numeričke simulacije su provedene primjenom fiksne mreže u rasponu Froudeovih brojeva ( $Fr$ ) od 0,3 do 0,75 za jednotrupni brod i tri katamarana s različitim razmacima između trupova. Provedena je verifikacija rezultata te je proračunata vrijednost ukupne numeričke nesigurnosti pri određivanju ukupnog otpora jednotrupnog broda i katamarana. Također provedena je i validacija rezultata usporedbom dobivenih numeričkih rezultata s dostupnim eksperimentalnim podacima. Pokazano je kako trend krivulje faktora interferencije u ovisnosti o  $Fr$  dobiven numeričkim simulacijama prati trend krivulje faktora interferencije dobiven eksperimentalnim ispitivanjima. Povoljna interferencija dobivena je pri  $Fr = 0,35$  za katamarane s razmakom između trupova  $H/L = 0,233$  i  $H/L = 0,300$ . Pri istom  $Fr$  provedene su numeričke simulacije primjenom preklapajuće mreže za sve konfiguracije katamarana te su dobiveni gotovo jednaki faktori interferencije kao i kod numeričkih simulacija uz primjenu fiksne mreže. Zaključeno je kako se faktor interferencije pri srednjim i nižim  $Fr$  može pouzdano odrediti numeričkim simulacijama uz primjenu fiksne mreže. Nadalje, provedena je detaljna analiza strujanja oko trupova katamarana te su analizirane slike valova, položaj slobodne površine na unutarnjem dijelu trupova katamarana, hidrodinamički tlak, tangencijalno naprezanje i profili valova u uzdužnoj simetralnoj ravnini. Konačno, pokazano je kako je numeričkim simulacijama primjenom fiksne mreže moguće odrediti optimalan razmak između trupova u svrhu određivanja povoljne interferencije pri srednjim i nižim vrijednostima  $Fr$ , dok je pri višim vrijednostima  $Fr$  potrebno primijeniti preklapajuću mrežu.

Ključne riječi: katamaran, interferencija, računalna dinamika fluida, fiksna mreža, preklapajuća mreža

**SUMMARY**

The topic of this paper is the numerical investigation of the interference occurrence for the Delft 372 catamaran using Computer Fluid Dynamics (CFD) within the STAR – CCM+ software package. The mathematical model consists of Reynolds Averaged Navier – Stokes Equations (RANSE) and the  $k - \omega$  SST (Shear Stress Transport) turbulence model. In this paper, an unsteady three-dimensional model of viscous flow is applied, while the position of the free surface is determined by the Volume Of Fluid method (VOF). Numerical simulations are carried out using a fixed mesh for the Froude number ( $Fr$ ) in the range from 0.3 to 0.75 for a monohull and three catamarans with different separations between demihulls. The verification study is performed, and the total numerical uncertainty for the prediction of the total resistance of a monohull and catamaran is assessed. The validation study is performed by comparing the obtained numerical results with the experimental data available in the literature. It is shown that the trend of the curve for the interference factor as a function of  $Fr$  obtained by numerical simulations follows the trend of the curve for the interference factor obtained experimentally. Favourable interference is obtained at  $Fr = 0.35$  for catamarans with a separation between demihulls of  $H / L = 0.233$  and  $H / L = 0.300$ . At the same  $Fr$ , numerical simulations are performed using an overset mesh for all catamaran configurations, and almost the same interference factors are obtained as in the case of numerical simulations using a fixed mesh. It can be concluded that the interference factor can be reliably determined using numerical simulations with fixed mesh at the intermediate and lower  $Fr$ . Furthermore, a detailed analysis of the flow around the catamaran demihulls is performed and the wave patterns, the location of the free surface on the inner part of the catamaran demihulls, hydrodynamic pressure, wall shear stress and wave profiles in the longitudinal symmetry plane are analyzed. Finally, it is shown that the optimal distance between the demihulls can be determined using numerical simulations with fixed mesh to determine favorable interference at the intermediate and lower  $Fr$  values, while at higher  $Fr$  values it is necessary to apply an overset mesh.

Keywords: catamaran, interference, Computational Fluid Dynamics, fixed mesh, overset mesh