

Andrija Ljulj, Ministarstvo obrane RH, [aljulj@morh.hr](mailto:aljulj@morh.hr)

Vedran Slapničar, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, [vedran.slapnicar@fsb.hr](mailto:vedran.slapnicar@fsb.hr)

## **VIŠEKRITERIJSKI KONCEPTUALNI PROJEKTNI MODEL RATNOG BRODA**

### **Sažetak**

Rad prikazuje višekriterijski konceptualni projektni model ratnog broda koji se sastoji od: samouravnoteženog dijela i ljuske za višekriterijsku optimizaciju. Samouravnotežena komponenta rješava brodograđevni dio problema, generira uravnotežena projektna rješenja u cilju dobivanja projekata zahtijevane istisnine i površine / volumena. Drugi dio modela je u funkciji višekriterijskog ocjenjivanja projekata, te identificiranja Pareto skupa projektnih rješenja. Projektne varijable odnose se na brodsku formu, te vrijednosti koji modeliraju taktičko tehničke značajke broda kao što su opcije instaliranog naoružanja, pogona, doplova, autonomnosti i zamjetljivosti. Funkcije cilja su atributi cijene i globalne učinkovitosti broda. Rad prikazuje rezultate programa Monako PRB koji je izrađen na temelju konceptualnog projektnog modela. Program temeljem postavljenih projektnih zahtjeva generira Pareto skup nedominiranih projektnih rješenja ratnog broda što je bio cilj ovog rada.

*Ključne riječi: konceptualni projektni model, ratni brod, višekriterijska optimizacija, Pareto skup nedominiranih rješenja*

## **MULTICRITERIAL CONCEPTUAL DESIGN MODEL OF NAVAL SHIP**

### **Summary**

This work presents a multicriterial model of a naval ship conceptual design. It is composed of two main parts: self-balanced component and part for generation of Pareto set of optimal solutions. The first component generates balanced projects of required displacement and required deck area / volume. The first component solves the shipbuilding related matters, the second component does multicriterial evaluations of projects, and identification of Pareto optimal set. The project variables are composed of the ship's form characteristics and those related to tactical and technical characteristics of the ship such as installed weapons, endurance, autonomy, and the ship signatures. Goal functions (attributes) are composed of ship cost and measure of global effectiveness of the ship. The final part of work presents results of Monako PRB program whose development is based on the above mentioned model. The program generates the set of Pareto optimal project solutions of naval ship size of corvette that was goal of this work.

*Key words: conceptual project model, naval ship, multicriteria optimization, Pareto set of nondominated solutions*

## 1. Uvod

Glavni cilj projektiranja ratnog broda je postizanje projekta koji će zadovoljiti postavljene taktičko-tehničke zahtjeve koje određuje vlasnik broda odnosno naručitelj. Taktičko-tehnički zahtjevi su rezultat izrade studija koje prethode ili su dio procesa projektiranja ratnog broda. To je taktička studija koja se bavi raščlambom taktike uporabe postojećih pomorskih snaga, a njezin rezultat je identificiranje nedostataka u primjeni taktičkih scenarija. Pored taktičke studije izrađuju se studija konceptijskih rješenja, čiji cilj je razvijanje više konceptijskih rješenja koja će odgovoriti na nastalu potrebu (nedostatke). Slijedi studija izvedivosti kojom se dokazuje izvedivost predloženih rješenja, te se vrši njihova usporedba. Ratni brod je vrlo skup proizvod i navedene opsežne studije rezultiraju s velikim brojem konceptualnih projekata prije nego se odabere varijanta koja se razrađuje u daljnjem procesu detaljnog projektiranja broda. Najkreativniji dio u projektiranju ratnog broda je onaj koji se odnosi na razvijanje konceptualnog projekta, dok je preostali dio koji se odnosi na izradu glavnog i izvedbenog projekta uglavnom rutinski posao projektanta. Intencija ovog rada je upravo u davanju doprinosa izradi studije konceptijskih rješenja i studije izvedivosti kroz izradu projektnog modela koji će omogućiti razvoj određenog broja konceptualnih projektnih rješenja te provjeru njihove izvedivosti. Težište ovog članka je u detaljnijem prikazu brodograđevnog dijela konceptualnog projektnog modela dok će dio koji se odnosi na višekriterijsku optimizaciju biti prikazan u skraćenom obliku. Razvijeni projektni model je višekriterijskog tipa, primijenjen je genetički algoritam i Pareto metoda u cilju dobivanja preferiranih projektnih rješenja, generiranje projektnih rješenja bazira se na variranju 19 projektnih varijabli, a atributi su cijena životnog ciklusa i globalna učinkovitost broda. Projektni model je pogodan za projektiranje višenamjenskog ratnog broda veličine manje korvete (300 – 1000 t), a uvođenjem određenih korekcija mogao bi se primijeniti za projektiranje drugih tipova ratnih brodova kao što su obalni i odobalni ophodni brodovi te brzi civilni brodovi. Radovi koji se bave ovom problematikom navedeni su u literaturi [1-9].

## 2. Teoretska podloga višekriterijske optimizacije

U ovom poglavlju prikazana je opća teorijska podloga višekriterijske optimizacije. Potrebno je odrediti minimum / maksimum:  
atributa (funkcija cilja),

$$f_m(x), \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

primjenom ograničenja nejednakosti,

$$g_j(x) \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (2)$$

ograničenja jednakosti,

$$h_k(x) = 0, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (3)$$

i projektnih varijabli

$$x_i^{(L)} \leq x_i \leq x_i^{(U)} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

U jednokriterijskoj optimizaciji postoji samo jedan atribut dok u ovom slučaju postoji više atributa za koje se traži minimalna ili maksimalna vrijednost. Kod jednokriterijske optimizacije konačan rezultat je jedno projektno rješenje dok u ovom slučaju je to niz projektnih rješenja koje dobivamo primjenom Pareto odabira preferiranih rješenja. U višekriterijskoj optimizaciji projektni prostor projektnog modela je definiran rasponima projektnih varijabli (4), unutar tog prostora postoje izvediva rješenja koja su definirana ograničenjima (2) i (3), te neizvediva.

S obzirom da je Pareto odabir preferiranih projektnih rješenja jedan od važnih dijelova ove metode dana je definicija Pareto optimalnog skupa preuzeta iz [10]:

Za slučaj minimizacije atributa (1), uz uvjete ograničenja (2) i (3), te projektne parametre (4) može se kazati da vektor rješenja  $x^P$  dominira drugi vektor rješenja  $x$  ako i samo ako

$$\forall m, f_m(x^P) \leq f_m(x) \wedge \exists m, f_m(x^P) < f_m(x), m \in \{1, 2, 3, \dots, M\} \quad (5)$$

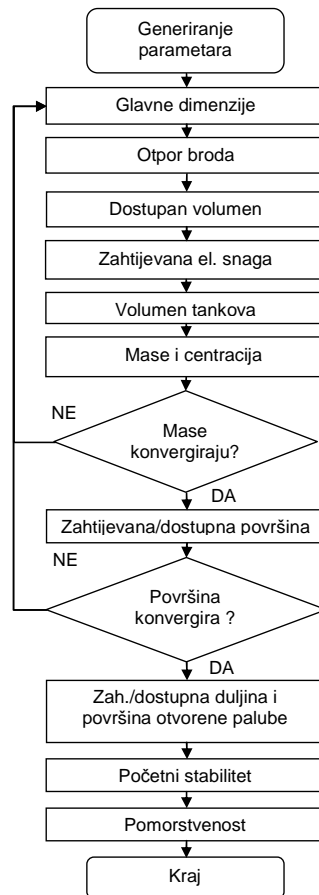
Rješenje je Pareto optimalno ako ga ne dominira niti jedno drugo rješenje. U višekriterijskoj optimizaciji obično se radi o skupu nedominiranih Pareto rješenja koja dominiraju sva druga rješenja u projektnom prostoru. Tijekom procesa Pareto rangiranja projektnih rješenja pored Pareto optimalnog skupa rješenja sortiraju se projektna rješenja u više skupova, od kojih je prvi skup Pareto optimalan i dominira sve ostale, drugi skup dominira treći i sve ostale itd.

U ovom radu kao optimizacijska metoda primijenjena je „Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm – II“ (NSGA-II) metoda kojom se generirana projektna rješenja filtriraju u cilju odvajanja izvodivih te rangiraju kako bi se u konačnici dobio skup preferiranih projektnih rješenja. Metoda je detaljno opisana u [11 – 13]. Projektne varijable i ograničenja ovog projektnog modela su opisani u 4., a atributi u 5. poglavlju. Parametri u projektnom modelu predstavljaju sve izračunate vrijednosti koje se temelje na projektnim varijablama. Cilj projektnog modela je dobivanje projektnih rješenja minimizacijom cijene i maksimizacijom globalne učinkovitosti broda.

### 3. Samouravnoteženi dio konceptualnog projektnog modela ratnog broda

U ovom poglavlju je opisan proces uravnoteženja broda u cilju dobivanja projekata koji za zadane ulazne projektne varijable forme i opterećenja daju brod zahtijevane istisnine sa dostupnim površinama palube i ukupnim volumenom koji je jednak zahtijevanom, što znači da je brod uravnotežen po masama i površinama. Dijagram toka koji opisuje redoslijed izvođenja pojedinih dijelova ovog dijela modela, te iterativne petlje kojima se postiže uravnoteženje projekta prikazan je na Slici 1 a temelji se na modelu prikazanom u [1]. Nakon generiranja projektnih varijabli (vidi Tablicu 1), vrši se sukcesivni proračun glavnih dimenzija projekta, otpora broda, dostupnog volumena, zahtijevane električne snage, volumena tankova, te masa i centracije toliko dugo dok se ne postigne uravnoteženje masa. Projekt uravnotežen po masama znači dobivanje projekta zahtijevane istisnine za zadane varijable (omjere i koeficijente brodske forme) i opterećenje broda (naoružanje, streljivo, oprema, posada itd.). Parametri iz prvog dijela (glavne dimenzije) se koriste u svim ostalim komponentama, dok se parametri svake komponente koriste kao ulazni parametri slijedeće komponente u nizu. Npr. parametri volumena koriste se u modulu za izračun potrebne električne snage, parametri otpora koriste za izračun volumena tankova itd. Kod prvog izračuna glavnih dimenzija broda pretpostavi se početna vrijednost mase istisnine, koja tijekom procesa konvergira prema zahtijevanoj masi istisnine broda. Ovisno o postavljenoj toleranciji, obično nakon 4 do 6 iteracija mase konvergiraju tj. dolazi se do projekta minimalne istisnine. Nakon konvergencije masa izračunavaju se dostupne i zahtijevane površine projekta koje se uravnotežuju primjenom izraza 10 tj. traženjem nul vrijednosti volumena nadgrađa. Traženje nul vrijednosti volumena nadgrađa je iterativno tj. volumen nadgrađa se korigira dok se ne dobije uravnoteženje zahtijevane i dostupne površine projekta. Za ovu potrebu u projektnom modelu korištena je metoda sekante koja je pouzdana, brzo konvergira i uvijek se dolazi do traženog rješenja kada je ono u području u kojem se izmjenjuje predznak promatrane funkcije. Nakon konvergencije površina koja se obično događa nakon 4 – 5 iteracija vrši se izračun početnog stabiliteta, pomorstvenosti i zahtijevane i dostupne duljine i površine otvorene palube. Ponekad se može dogoditi da mase ne konvergiraju i to je vrlo rijetko dok kod površina to može biti i češće. Projektna rješenja koja

ne konvergiraju se odbacuju i ne razmatraju u daljnjem tijeku projektnog modela kada se vrši odabir preferiranih projekata.



**Slika 1.** Dijagram toka samouravnoteženog dijela projektnog modela

**Fig. 1** Flowchart of self-balanced part of project model

Za izračun glavnih dimenzija broda primjenjuju se izrazi:

$$L_{WL} = 10 (\nabla / C_{DL})^{1/3} \quad [m] \quad (6)$$

$$B = (C_{BT} \cdot \nabla) / (C_P \cdot C_M \cdot L_{WL})^{1/2} \quad [m] \quad (7)$$

$$T = \nabla / (C_P \cdot C_M \cdot L_{WL} \cdot B) \quad [m] \quad (8)$$

$$H_{T10} = L_{WL} / C_{LH} \quad [m] \quad (9)$$

Otpor broda određen je po [14-15] čiji rezultati zadovoljavaju za potrebe konceptualnog projekta. Za otpor privjesaka nije vršen poseban proračun već je uzet kao postotak od golog otpora trupa prema sličnom brodu. Brodski vijci nisu optimizirani već je za njihov promjer korišten iskustveni izraz iz [3]. Alternativa ovom pristupu je proračun propulzije i pripadnih propulzijskih koeficijenata kako je prikazano u [21]. Forma projektnog modela je poludeplasmanska sa izraženim V pramčanim i U krmenim rebrima. Forma je opisana standardnim parametarskim jednadžbama primjenom izraza za omjere brodske forme i brodskih koeficijenata. Dostupan volumen izračunava se kao suma podvodnog dijela trupa

koji predstavlja istisninu broda, nadvodni dio trupa te volumen nadgrađa. Volumen nadgrađa se dobiva iz jednadžbe uravnoteženja zahtijevanih i dostupnih površina broda:

$$A_{TR}-A_{TA}(V_N) = 0 \quad (10)$$

Zahtijevana električna snaga predstavlja bilansu snage svih potrošača na brodu. Dostupna električna snaga je izražena kroz ukupnu snagu dva diesel agregata koji se mogu koristiti u normalnim radnim uvjetima broda dok treći služi kao pričuva u izvanrednim uvjetima.

Ukupni volumen tankova ratnog broda sastoji se od volumena tankova goriva za propulziju, tankova goriva za potrebe proizvodnje električne energije na brodu, tankova pitke vode, tanka otpadnih voda, tankova ulja za podmazivanje pogonskih i pomoćnih strojeva, tankova otpadnog ulja te tankova balasta. Proračun mase goriva propulzije odnosi se na potrošnju goriva diesel motora pri ophodnoj ekonomičnoj brzini broda, budući je pogon za ophodnu brzinu broda u svih 11 predviđenih opcija diesel motor. Masa goriva ovisi o doplovu broda što je zadana vrijednost koja se varira u projektnom modelu u tri vrijednosti 1000, 125 i 1500 nautičkih milja, ophodnoj brzini i specifičnoj potrošnji goriva koja je određena iz kataloga proizvođača.

Kod razmatranja masa i proračuna centracije u projektnom modelu mase broda su podijeljene u skupine sukladno podjeli koju je razvila mornarica Sjedinjenih Američkih Država „Expanded Ship Work Breakdown Structure“ (ESWBS). U projektnom modelu određuje se samo vertikalni položaj težišta broda koji se primjenjuje u izrazu za izračun metacentarske visine, dok se uzdužni položaj težišta broda ne razmatra, već se pretpostavlja da je brod uravnotežen u uzdužnoj ravnini tj. da se položaj težišta nalazi iznad težišta uzgona broda. Mase broda su određene na tri načina. Prvi se odnosi na mase naoružanja i opreme koje su bile dostupne iz kataloga proizvođača. Drugi se odnosi na određivanje masa trupa primjenom [16], „Rules and Regulations for the Classification of Special Service Craft“ od Lloyd Registra u projektnom modelu vrši se proračun konstrukcijskih elemenata broda čija geometrija poprečnog presjeka se primjenila za izračun mase konstrukcijskih elemenata te mase ukupnog trupa broda. Pored [16] primijenjeni su iskustveni izrazi za određivanje površina pojedinih dijelova broskog trupa (npr. pregrade, bok, paluba i sl.) iz [9] jer se masa određivala po jedinice površine te se zatim izračunavala masa za cijelu predmetnu površinu. Treći način odnosi se na mase električnog broskog sustava, broskih pomoćnih sustava, brodske opreme i namještaja koje su određene prema sličnom brodu. Vertikalni položaj težišta svih masa određen je na temelju smještaja mase na projektnom modelu za koju svrhu je razvijen uzdužni presjek broda sa svim prostorima ili primjenom analogije sa sličnog broda. Dostupna površina palube broda dobiva se iz geometrijskih karakteristika generiranih projektnih rješenja dok zahtijevana površina se dobiva iz tlocrtne površine naoružanja i opreme koji su smješteni u trupu, na glavnoj palubi ili nadgrađu broda. U tlocrtu površinu uključena je i površina za pristup, operiranje i održavanje brodske opreme. Dostupna duljina palube dobiva se na temelju dostupne duljine izložene palube generiranih projektnih rješenja dok zahtijevana duljina palube se dobiva sumiranjem zahtijevane duljine naoružanja i opreme koja su ugrađuju na otvorenu palubi. Isti princip vrijedi za dostupnu i zahtijevanu površinu izložene palube. Nakon uravnoteženja projektnih projekata po masama i površinama izračunava se početni stabilitet i pomorstvenost projekta. Položaj metacentarske visine izračunava se primjenom standardnih izraza dok se za vertikalni položaj težišta istisnine po visini primjenjuje iskustveni izraz

$$K_B = (T/3) (2.5 - C_p \cdot C_M / C_{WP}) \text{ [m]} \quad (11)$$

Konačni kriterij stabiliteta je bezdimenzionalni koeficijent  $G_M/B$  koji je detaljnije opisan u poglavlju o ograničenjima projektnog prostora. Za određivanje pomorstvenosti primjenjen je

iskustveni izraz iz [16] kojim se izračunava vertikalno ubrzanje težišta broda, a temelji se na rezultatima ispitivanja pomorstvenosti velikog broja modela i brodova u naravi:

$$a_v = 1.5 \theta_B \cdot L_1 (H_1 + 0.084)(5 - 0.1\theta_D) \Gamma^2 \times 10^{-3} \quad (12)$$

gdje je

$$L_1 = \frac{L_{WL} \cdot B_C^3}{B_W \cdot \Delta} \quad (13)$$

$$\Gamma = \frac{U}{\sqrt{L_{WL}}} \quad (14)$$

#### 4. Projektni varijable i ograničenje projektnog prostora

Projektne varijable u modelu prikazane su u Tablici 1, a ukupno ih ima 19. Prvih 7 projektnih varijabli odnosi se na brodsku formu, dok se ostale odnose na materijal trupa i nadgrađa, brodski pogonski sustav, doplov, autonomnost, opcije broskog naoružanja te opcije zamjetljivosti ratnog broda.

U projektnom modelu uvedena su slijedeća ograničenja projektnog prostora kojim se definiraju izvediva projektna rješenja. Maksimalna održiva brzina broda mora biti najmanje 28 čvorova. Do ovog ograničenja došlo se na temelju razmatranja baze podataka ratnih brodova tipa korvete iz [2]. Ovo ograničenje može se mjenjati i prvenstveno ovisi o zahtjevima vlasnika broda. Ukupna zahtjevana električna snaga na brodu mora biti manja od instalirane snage diessel agregata. Sukladno projektnom modelu na brodu su instalirana dva diessel agregata ukupne snage 408 kW te jedan za potrebe nužde. Iz navedenog proizlazi da zahtjevana električna snaga mora biti manja od 408 kW. Minimalna visina trupa broda u projektnom modelu u funkciji je uzdužne čvrstoće broda, visine glavnih strojeva te stabiliteta broda u oštećenom stanju.

$$H_{T10\min} \geq L_{WL} / 14 \quad [m] \quad (15)$$

Ovaj izraz temelji se na iskustvenim podacima iz [2] gdje je dan omjer duljine broda i visine trupa 30 korveta koji se kreće u rasponu od 8 do 16. Odabrana je granična vrijednost omjera  $L_{WL} / H_{T10}$  od 14. Drugi kriterij odnosi se na ograničenje visine trupa broda s obzirom na mogućnost smještaja pogonskih strojeva u strojarnicu:

$$H_{T10\min} \geq H_{MB\min} \quad (16)$$

$$H_{MB\min} = V_{DVO} + H_{GS}(OPSRB) + (1/2) H_{IP} \quad [m] \quad (17)$$

$(1/2)H_{IP}$  – visina od gornjeg ruba glavnih strojeva do glavne palube ovisna o opciji pogonskog sustava [m]. Treći kriterij odnosi se na stabilitet broda u oštećenom stanju i zahtjeva da rub glavne palube broda mora biti iznad vode kod nagiba broda od  $25^\circ$ . Iz jednostavne geometrije dolazi se do izraza:

$$H_{T10\min} \geq (B_d / 2) \text{tg}(25^\circ) + T \quad [m] \quad (18)$$

**Tablica 1.** Projektne varijable modela

**Table 1** Design variables of model

Rbr	Projektne varijable	Opis	Minimalna vrijednost	Maksimalna vrijednost
Projektne varijable forme broda				
1	$C_P$	Uzdužni prizmatički koeficijent	0.55	0.75
2	$C_M$	Koeficijent glavnog rebra	0.55	0.85
3	$C_{DL}$	Volumetrijski koeficijent	1.0	5.0
4	$C_{BT}$	Omjer B i T	2.5	5.0
5	$C_{LH}$	Omjer L i H	7.0	13.0
6	$C_{RD}$	Omjer duljine od AP do početka kaštela i $L_{WL}$	0.45	0.55
7	$C_{RT}$	Omjer uronjene površine zrcala i glavnog rebra	0.4	0.6
Projektne varijable materijala, pogona, doplova autonomnosti, naoružanja i zamjetljivosti				
8	<i>OMAT</i>	Opcije materijala trupa i nadgrađa	1- standardni brodogr. čelik 2- čelik povišene čvrstoće 3- Al legura	
9	<i>OPSNS</i>	11 opcija pogonskog sustava broda predefiniirano je u projektnom modelu s obzirom na glavne pogonske strojeve i tip propulzora (vidi prilog 2)	1. CODOG s vodomlaznim FPP ili CPP propulzorom 2. CODAG s vodomlaznim FPP ili CPP propulzorom 3. CODAD s vodomlaznim FPP ili CPP propulzorom	
10	<i>OPENS</i>	Opcije doplova broda	1000, 1250 ili 1500 NM	
11	<i>OANS</i>	Opcije autonomnosti broda	7, 10 ili 15 dana	
12	<i>OBGNS</i>	Opcije pramčanog topa	1 – Bofors 40 mm 2 – Bofors 57 mm 3 – Oto Melara 76 mm	
13	<i>OASMS</i>	Opcije protubrodskog raketnog sustava	1 – 2 RBS 15B 2 – 4 RBS 15B 3 – 8 RBS 15B	
14	<i>OLTOR</i>	Opcije torpednog naoružanja	1 – 2 LT 342 mm 2 – 4 LT 342 mm 3 – 6 LT 342 mm	
15	<i>OAAS</i>	Opcije PZO sustava	1 – PZO top AK630 2 – PZO raketni sustav	
16	<i>ORS</i>	Opcije radarske zamjetljivosti	1 – obična izvedba 2 – „stealth“ izvedba	
17	<i>OIRS</i>	Opcije infra crvene zamjetljivosti	1 – obična izvedba 2 – izvedba s reduciranom IC zamjetljivošću	
18	<i>OMAGS</i>	Opcija magnetske zamjetljivosti	1 – obična izvedba 2 – izvedba s ugrađenim sustavom smanjenja mag. Z.	
19	<i>ONBC</i>	Opcija nuklearno, biološko, kemijske zamjetljivosti	1 – obična izvedba 2 – izvedba s ugrađenim NBK sustavom	

Nadalje, zahtijevana površina palube mora biti veća od dostupne površine palube generiranih projekata. Ograničenje početnog stabiliteta je:

$$0.05 \leq G_M / B \leq 0.15 \quad (19)$$

Sukladno [17] kriterij za vertikalne akceleracije ratnog broda veličine fregate ne bi smio premašiti 0.2 g. Ovaj kriterij je razvio NATO za brodove veličine fregate, a za potrebe ovog projektog modela on je ublažen na 0.25 g zbog činjenice da se ovdje radi o osjetno manjem brodu a samim time za očekivati je postizanje nešto većih akceleracija. U civilnim kriterijima taj iznos se kreće u rasponu od 0.25 g do 0.3 g. Ograničenje za ovaj kriterij je:

$$a_{RMS} \leq 0.25 \text{ g} \quad (20)$$

Zadnja dva ograničenja odnose se na ograničenje duljine i površine otvorene palube kod kojih zahtijevana duljina i površina otvorene palube moraju biti veće od duljine i površina

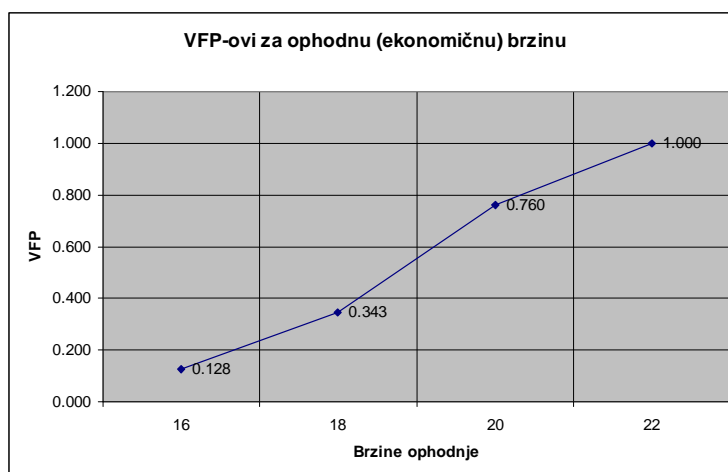
otvorene palube generiranih projektnih rješenja. Iz navedenog se može zaključiti da je izvedivi projektni prostor kompleksan, višedimenzionalan i najvjerojatnije isprekidan što predstavlja veliki izazov kod određivanja preferiranih projektnih rješenja.

## 5. Projektni atributi i integracija samouravnog modela s metodom optimizacije

Atributi projektnog modela koji su primijenjeni u ovom radu su: atribut globalne učinkovitosti i atribut cijene životnog ciklusa broda. Atribut globalne učinkovitosti broda sastoji se od 13 specifičnih atributa koji imaju utjecaj na taktičko-tehničke značajke broda kao što je brzina, doplov, naoružanje, autonomnost, mogućnost preživljavanja, a predstavlja ukupnu učinkovitost broda. Ovaj atribut je dobiven primjenom težinskih koeficijenata koji su dobiveni primjenom Satyve teorije o više-kriterijskoj učinkovitosti, te analitičkog hijerarhijskog procesa (AHP) [18-19]. Izraz za  $A_{GU}$  je:

$$A_{GU} = \sum_{i=1}^N K_{TK}(i) \cdot V_{FP}(i) \quad (21)$$

Funkcije performansi  $V_{FP}(i)$  su diskretne ili kontinuirane vrijednosti također dobivene primjenom Satyve teorije. Primjer VFP funkcije prikazan je na Slici 2.



Slika 2. Primjer vrijednosti funkcije performansi za ophodnu brzinu

Fig. 2 Example values for function of performance for cruising speed

U Tablici 2 prikazani su konačni težinski koeficijenti svih 13 specifičnih atributa koji doprinose proračunu vrijednosti  $A_{GU}$ . Primjenom  $A_{GU}$  uvedene su taktičke značajke broda u projektni model što je bio jedan od značajnijih zahtjeva kod razvijanja projektnog modela.

Tablica 2. Konačni težinski koeficijenti specifičnih atributa za proračun  $A_{GU}$

Table 2 Final weights for specific attributes for  $A_{GU}$  calculation

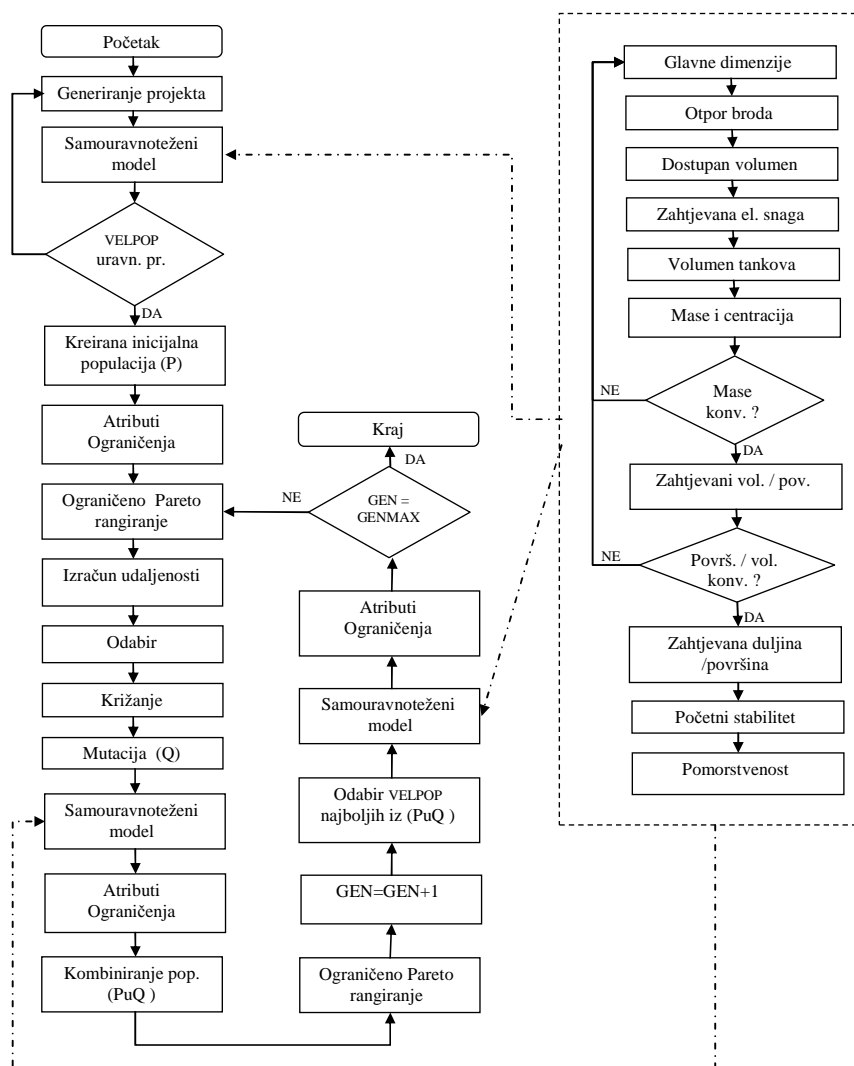
ASMS	BGUN	LTOR	AAS	MSS	SPA	END	AUT	RS	IRS	NBC	HAS	EMS
0.3042	0.0306	0.0988	0.1663	0.0189	0.0637	0.0536	0.1019	0.1019	0.028	0.0244	0.0176	0.028

Atribut cijene sastoji se od cijene gradnje ratnog broda, te dijela cijene koja se odnosi na troškove posade, goriva i maziva, te održavanja broda tijekom njegova životnog ciklusa. Atribut cijene određen je iz dostupnih podataka o cijenama naoružanja i vojne opreme te procijenjenim cijenama materijala i [20]. Atributi u projektnom modelu predstavljaju funkcije cilja koje se optimiziraju. U ovom konkretnom slučaju potrebno je dobiti projektna rješenja najmanje cijene i najveće učinkovitosti. Projektna rješenja se rangiraju i ocjenjuju na temelju vrijednosti ovih atributa, te se tijekom provedbe genetičkog algoritma i Pareto rangiranja u



konačnici dolazi do Pareto optimalnog fronta tj. nedominiranih projekata što je i cilj ovog rada.

U konačnici izvršena je integracija samouravnoteženog dijela modela koji je opisan u poglavlju 3, te optimizacijskog dijela čije glavne komponente su NSGA-II optimizacijski genetički algoritam s primjenom Pareto metode traženja nedominiranih projektnih rješenja. Dijagram toka integracije projektnog modela i optimizacijske metode prikazan je na Slici 3. Na temelju gore opisanog matematičkog modela i dijagrama toka na Slici 3 izrađen je program čiji rezultat je dobivanje preferiranih projektnih rješenja. Glavni program se sastoji od 39 podmodula, ukupno uključujući komentare ima 5122 linija koda, te 163.84 kB. Program je napisan u MS Visual Studio, Visual Basic. Jedan dio ulaznih podataka unosi se s ulazne forme dok ostali ulazni podaci koji se odnose na značajke pojedine opreme i naoružanja kao što je masa, položaj težišta po visini, zahtijevana tlocrtna površina, potrebna električna snaga, te cijene se nalaze u podmodulu ulaznih podataka strukturirani u obliku baze podataka. Pojedine vrijednosti iz baze podataka se pozivaju kod izračuna površine, potrebne električne snage, mase i centracije, cijene, te ostalih značajki projekta. Program je strukturiran u obliku optimizacijske ljuske koja primjenjuje metodu NSGA-II koja poziva samouravnoteženi dio modela kako je prikazano na Slici 3. Kako bi program bio što pouzdaniji svi podmoduli su testirani zasebno, te nakon njihove integracije u cijeli program.

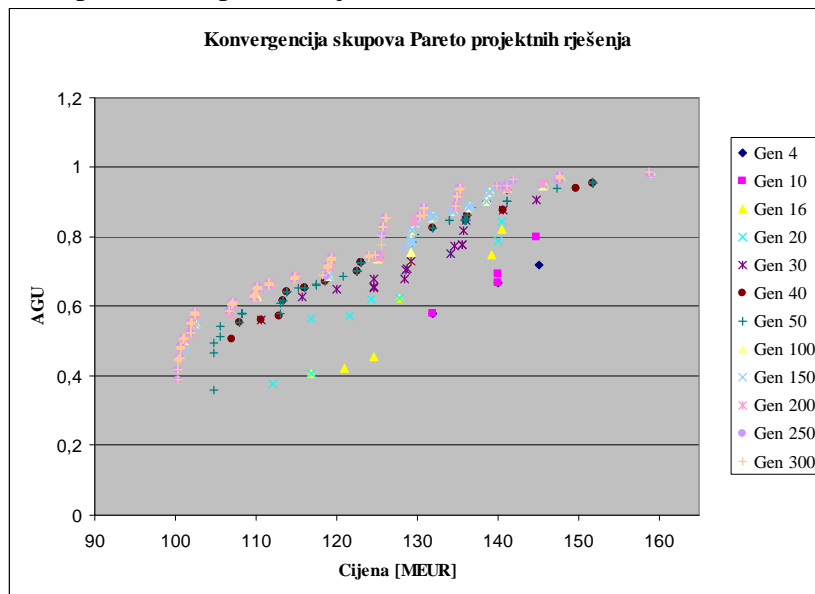


Slika 3. Dijagram toka integracije projektnog modela i primijenjene metode

Fig. 3 Flowchart of the design model and applied method integration

## 6. Rezultati i zaključak

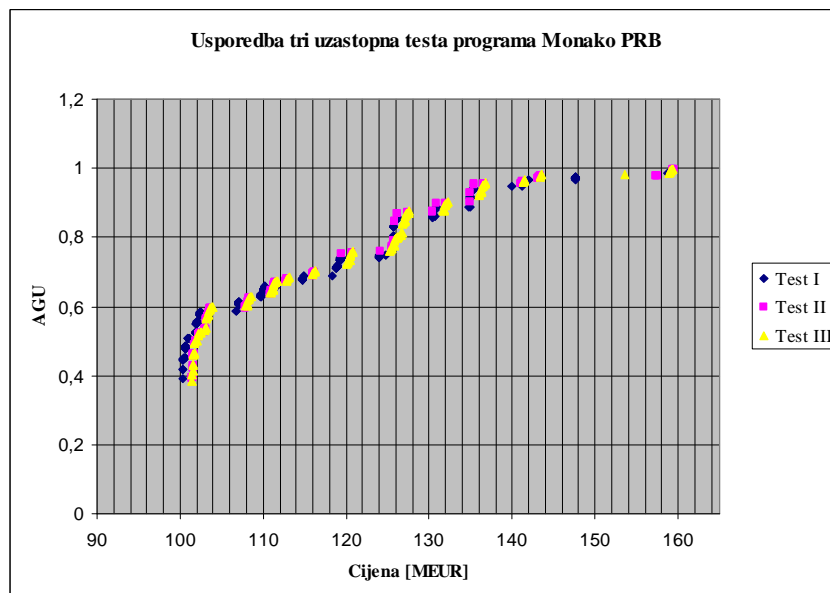
Na izrađenom programu izvršen je niz testova (analiza osjetljivosti) koji su prikazani u ovom poglavlju. Slika 4 prikazuje konvergenciju skupova Pareto projektnih rješenja u različitim ciklusima provedbe optimizacije.



**Slika 4.** Konvergencija skupova Pareto projektnih rješenja (za 12 generacija)

**Fig. 4** Convergence of Pareto set of design solutions ( for 12 generations)

Slika 5. prikazuje rezultate testa izvedbe programa tri puta sa slučajno odabranim ulaznim projektnim varijablama. Svaki put rezultati se poklapaju u blizini idealnog Pareto fronta što pokazuje sa su izlazni rezultati stabilni tj. da daju očekivana Pareto optimalna rješenja.

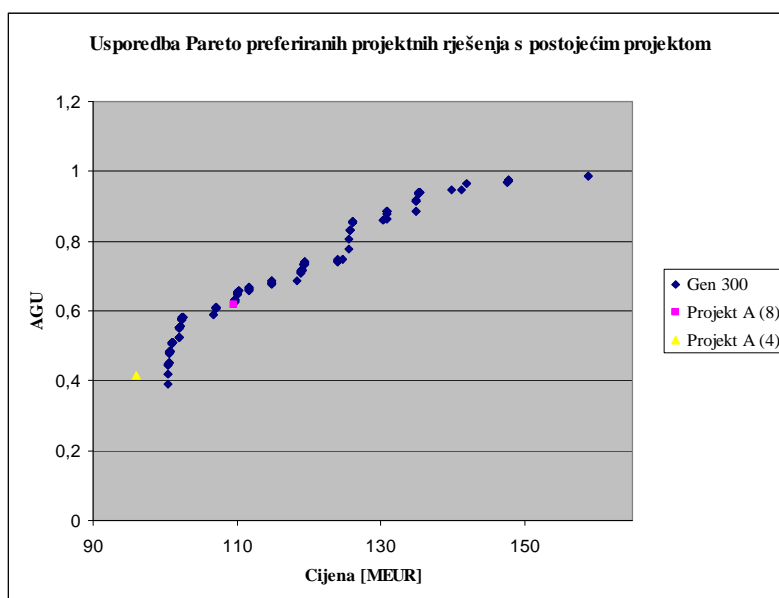


**Slika 5.** Stabilnost izlaznih rezultata na tri uzastopna proračuna (300. generacija)

**Fig. 5** Stability of output results for 3 consecutively calculations (300 generations)

Na Slici 6 prikazan je skup Pareto preferiranih projektnih rješenja i jedan postojeći projekt A. Postojeći projekt A s 8 PBRS raketa je pozicioniran vrlo blizu Pareto fronta što je još jedan argument potvrde pouzdanosti razvijenog projektnog modela. To znači da predmetni

projektne modele daju projektne rješenja koja su vrlo blizu postojećeg projekta koji je detaljno razvijen projekt u svim svojim segmentima kao što je masa i centracija, optimizacija mase, stabilitet, otpor, pomorstvenost itd. Projekt A s 4 PBRS rakete je pozicioniran izvan projektne prostora kao što je prikazano na Slici 6. Razmatranjem projektne ograničenja u predmetnom projektne modelu uočeno je da postojeći projekt ne bi zadovoljio ograničenje početnog stabiliteta zbog toga što je koeficijent omjera  $G_M$  naspram B iznosi 0,185 dok  $C_{GMB}$  mora biti u granicama od 0.05 do 0.15. Iz navedenog proizlazi da postojeći projekt ima preveliku metacentarsku visinu, tj. brod je „krut“ i ima mali period ljuljanja te veća kutna ubrzanja, te kao takav bi bio odbačen u predmetnom projektne modelu. Postojeći projekt A također ne bi zadovoljio niti ograničenje pomorstvenosti budući da vertikalna ubrzanja na mostu kod maksimalne trajne brzine od 32 čvora značajno premašuju graničnu vrijednost vertikalnih ubrzanja od 0.25g i iznose 0,42g. Iz navedenog se može zaključiti da postojeći projekt A ne bi zadovoljio postavljena ograničenja, te ne bi bio u skupini izvedivih projektne rješenja.



**Slika 6.** Usporedba Pareto preferiranih projektne rješenja s postojećim projektom A

**Fig. 6** Comparison of Pareto set design solutions with existing design A

U Tablici 3 prikazana je usporedba pojedinih parametara projekta A i najbližeg projekta s Pareto krivulje. Ovim radom razvijen je višekriterijski konceptualni projektne model za projektiranje manjeg višenamjenskog ratnog broda. Konačan rezultat predmetnog projektne modela je dobivanje skupa Pareto nedominiranih projektne rješenja. Za potrebu razvoja predmetnog projektne modela razmotrena je sva potrebna teorija koja se odnosi na brodograđevni dio i dio koji rješava odabir preferiranih projektne rješenja, te je izrađen program Monako PRB. Izlazni rezultati programa Monako PRB su se pokazali pouzdani i stabilni primjenom standardnih testova konvergencije projektne rješenja, ponavljanja proračuna, te usporedbe projektne rješenja s postojećim projektima.

**Tablica 3.** Usporedba projekta A i najbližeg projekta s Pareto fronte  
**Table 3** Comparison of design A and the closest design on Pareto front

	Monako PRB	Projekt A
$L_{WL}$	45.35	49.76
B	6.46	7.28
T	2.19	2.1
$H_{T10}$	4.57	4.5
$C_P$	0.75	0.70
$C_B$	0.58	0.45
$C_M$	0.78	0.65
$C_{WP}$	0.9	0.78
$D_P$	1.99	1.2
$P_{PAT}$	3440	3572
$P_{MCR}$	10320	10716
$U_S$	28.68	32.4
$U_E$	19.19	18
$U_{MAX}$	30.42	36.4
$W_{LS}$	289	283.6
$W_T$	385	389.9
$G_M$	0.4	1.35
$C_{GMB}$	0.063	0.185
$A_M$	0.24	0.42
$A_{GU}$	0.6324	0.6179
$C_{TLC}$	109.99	109.6238

Razvijeni projektni model predstavlja sintezu znanja iz raznih brodograđevnih područja te optimizacije koja se primjenjuje na višoj razini što rezultira jednim sinergijskim učinkom i dobivanju preferiranih, boljih projekata. Predmetni projektni model se uz manje prilagodbe može primijeniti za projektiranje drugih tipova ratnih brodova kao što su obalni i odobalni ophodni brodovi, logistički brodovi, brodovi za istraživanje, te za potrebe projektiranja civilnih brodova. U postojećem projektnom modelu svakako postoji prostora za nadogradnju i njegovo poboljšanje. To se u prvom redu odnosi na primjenu drugih metoda kod proračuna otpora broda čime bi postojeći projektni model mogao razvijati projekte brodova različitih formi, a samim time i različitih tipova brodova. Daljnja nadogradnja odnosi se na bolje opisivanje pojedinih skupina masa broda kao što je oprema broda i brodski pomoćni sustavi. Za ovu potrebu u postojećem projektnom modelu primijenjeni su podaci sa manjeg broja sličnih brodova, dok bi predmetni projektni model bio bolji kada bi se primijenio veći broj sličnih brodova. Značajna poboljšanja mogla bi se učiniti na području proračuna stabiliteta i pomorstvenosti uvođenjem modela s detaljnijim proračunima. Za provedbu navedenog bilo bi potrebno raspolagati sa superbrzim računalom koje bi bilo u stanju u relativno kratkom vremenu provoditi kompleksne proračune pomorstvenosti. U cilju kontinuiranog korištenja predmetnog projektnog modela potrebno je povremeno vršiti ažuriranje baze ulaznih podataka koja sadrži podatke o masama, zahtijevanoj površini i cijenama opcija opreme i naoružanja. Zaključujući ovaj rad može se ocijeniti da je razvojem projektnog modela i analizom njegovih izlaznih rezultata model dao očekivane rezultate i ispunio najveći dio postavljenih ciljeva ovog rada.

## Literatura

- [1] REED, M.: "Ship Synthesis Model for Naval Surface Ships", magistarski rad, Massachusetts Institute of Technology, 1976
- [2] YASIN KARA, M.: "A Tool for Evaluating the Early-Stage Design of Corvettes", magistarski rad, Massachusetts Institute of Technology, 2010
- [3] SHAHAK, S.: "Naval Ship Concept Design: an Evolutionary Approach", magistarski rad, Massachusetts Institute of Technology, 1998
- [4] BROWN, A., J., SALCEDO, J.: "Multi-Objective Optimization in Naval Ship Design", Naval Engineers Journal Vol. 115, No. 4, pp. 49-61. 2003
- [5] BROWN, A., GOOD, N.: "Multi-Objective Concept Design of an Advanced Logistics Delivery System Ship", ASNE Joint Sea Basing Symposium, 2006
- [6] MIERZWICKI, T., S.: "Risk Index for Multi-Objective Design Optimization of Naval Ships", magistarski rad, Faculty of Virginia, Polytechnic Institute and State University, 2003
- [7] DEMKO, D.: "Tools for Multi-Objective and Multi-Disciplinary Optimization in Naval Ship Design", magistarski rad, Faculty of Virginia, Polytechnic Institute and State University, 2005
- [8] GRUBIŠIĆ, I., BEGOVIĆ, E.: "Multi-attribute Concept Design Model of Patrol, Rescue and Antiterrorist Craft", 7th International Conference on FAST Sea Transportation, FAST 2003, Ischia 7-10 Oct. 2003, Vol 3, D1, pp. 91-98.
- [9] GRUBIŠIĆ, I.: "Osnovni kompjutorski sistem za projektiranje ratnog broda do faze idejnog projekta", FSB u Zagrebu, 1987
- [10] LIU, N., HUANG, B., PAN, X.: "Using the Ant Algorithm to Derive Pareto Fronts for Multiobjective Siting of Emergency Service Facilities", Journal of the Transportation research Board, str. 120-129, 2005
- [11] DEB, K., AGRAWAL, S., PRATAP, A., MEYARIVAN, T.: "A Fast Elitist Non-Dominated Sorting genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGA-II", Kanpur Genetic Algorithms Laboratory, (<http://www.iitk.ac.in/kangal>)
- [12] SESHADRI, A.: "A Fast Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II"
- [13] DEB, K., PRATAP, A., AGARWAL, S., MEYARIVAN, T.: "A fast and Elitist Multiobjective genetic Algorithm: NSGA-II" International Journal of Computing & Information Sciences, 2002
- [14] HOLTROP, J., MENNEN, G., G., J.: "An Aproximate Power Prediction Method", 1982
- [15] HOLTROP, J.: "A Statistical Re-analysis of Resistance and Propulsion Data", 1984
- [16] LLOYD REGISTER: "Rules and Regulations for the Classification of Special Service Craft", 2011
- [17] NATO STANDARDIZATION AGREEMENT 4154: "Common Procedures for Seakeeping in the Ship Design Process", NATO Standardization Agency, 2000
- [18] THOMAS L. SAATY: "Some Mathematical Concepts of the Analytic Hierarchy Process", 1991
- [19] THOMAS L. SAATY: "Decision Making with the Analytic Hierarchy Process", Int. J. Services Sciences, Vol. 1, 2008
- [20] BRODARSKI INSTITUT: "Studija izvedivosti za obalni ophodni brod HRM", 2008
- [21] LJULJ, A.: "Višekriterijski konceptualni projektni model generičkog tipa višenamjenskog ratnog broda", doktorski rad, FSB u Zagrebu, 2012

## Popis oznaka

$\theta_D$	nagib dna broda na glavnom rebru u odnosu na ravninu osnovice, [°]
$\theta_B$	srednji nagib oplata dna u odnosu na osnovicu za određeni presjek broda, [°]
$\Delta$	masa istisnine, [t]
$\Gamma$	koeficijent u izrazu za vertikalna ubrzanja težišta broda,
$\nabla$	volumen istisnine, [m <sup>3</sup> ]
$AAS$	protu-zrakoplovni sustav,
$A_{GU}$	(OMOE - „overall measure of effectiveness“) atribut globalne učinkovitosti ratnog broda, [-]
$a_{RMS}$	vertikalno ubrzanje izraženo kao RMS vrijednost, [g]
$ASMS$	protu-brodski raketni sustav,
$A_{TA}$	ukupna dostupna površina paluba broda, [m <sup>2</sup> ]
$A_{TR}$	ukupna zahtjevana površina broda, [m <sup>2</sup> ]
$AUT$	autonomnost broda, [dana]
$a_V$	vertikalno ubrzanje težišta broda (prosjeak 1/100 najviših), [g]
$B$	širina broda na glavnom rebru na vodnoj liniji, [m]
$B_C$	širina trupa na uzvojnim tangencijalnim točkama, [m]
$B_d$	širina broda na krmenom zrcalu na palubi čvrstoće, [m]

<i>BGUN</i>	pramčani top,
$B_w$	širina trupa broda na vodnoj liniji na LCG, [m]
$C_{BT}$	omjer širine broda na glavnom rebru na vodnoj liniji i gaza broda, [-]
$C_{DL}$	volumetrijski koeficijent, [-]
$C_{LH}$	omjer duljine broda na vodnoj liniji i visine trupa broda na glavnom rebru, [-]
$C_M$	koeficijent glavnog rebra, [-]
<i>CODAD</i>	kombinacija pogona diesel motora i plinske turbine,
<i>CODOG</i>	kombinacija pogona diesel motora ili plinske turbine,
$C_P$	uzdužni prizmatički koeficijent, [-]
<i>CPP</i>	propeler s promjenjivim usponom,
$C_{RD}$	omjer duljine kaštela i duljine broda na vodnoj liniji, [-]
$C_{TR}$	omjer površine zrcala i površine glavnog rebra, [-]
<i>EMS</i>	elektro magnetska zamjetljivost,
<i>END</i>	doplov,
<i>FPP</i>	propeler s fiksnim usponom krila,
$f_m(x)$	funkcije atributa kod višekriterijske optimizacije, [-]
<i>GEN</i>	generacija,
<i>GENMAX</i>	maksimalan broj generacija,
$g_j(x)$	jednakosne funkcije ograničenja, [-]
$G_M$	metacentarska visina, [m]
$H_I$	koeficijent u izrazu za vertikalna ubrzanja broda,
<i>HAS</i>	hidroakustička zamjetljivost,
$H_{IP}$	prosječna visina između paluba, [m]
$h_k(x)$	nejednakosne funkcije ograničenja,
$H_{T10}$	visina trupa broda na LPP/2, [m]
$H_{T10\min}$	minimalna visina trupa na glavnom rebru, [m]
<i>IRS</i>	infra crvena zamjetljivost,
$K_B$	udaljenost od osnovice do težišta uzgona broda, [m]
$K_{TK}(i)$	konačni težinski koeficijenti u globalnoj učinkovitosti, [-]
$L_I$	koeficijent u izrazu za vertikalna ubrzanja broda,
<i>LTOR</i>	lako torpeda,
$L_{WL}$	duljina vodne linije, [m]
<i>MSS</i>	maksimalna održiva brzina,
<i>NBC</i>	nuklearno, biološko, kemijski,
<i>OANS</i>	opcije autonomnosti broda,
<i>OPENS</i>	opcije doplova broda,
<i>OIRS</i>	opcije IC zamjetivosti,
<i>OMAGS</i>	opcija magnetske zamjetivosti,
<i>OMAT</i>	opcije materijala trupa i nadgrađa,
<i>ONBC</i>	opcije NBC zamjetivosti,
<i>OASMS</i>	opcije protubrodskog raketnog sustava,
<i>OPSNS</i>	opcije pogonskog sustava broda,
<i>OBGNS</i>	opcije pramčanog topa,
<i>OAAS</i>	opcije PZO sustava,
<i>ORS</i>	opcije radarske zamjetivosti,
<i>OLTOR</i>	opcije torpednog naoružanja,
<i>RS</i>	radarska zamjetljivost,
<i>SPA</i>	ophodna brzina,
<i>T</i>	gaz broda mjereno od osnovice koja prolazi najnižom točkom rebra najveće površine do
$VL$ , [m]	
<i>U</i>	brzina broda, [m/s]
$V_S$	volumen nadgrađa, [m <sup>3</sup> ]
<i>VELPOP</i>	veličina populacije,
$x_i$	projektne varijable projektnog modela, [-]