Projektne procedure i matematički modeli u osnivanju brodova pune forme

Čudina, Predrag

Scientific master's theses / Magistarski rad

2006

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:427952

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

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

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

PROJEKTNE PROCEDURE I MATEMATIČKI MODELI U OSNIVANJU BRODOVA PUNE FORME

MAGISTARSKI RAD

PREDRAG ČUDINA, DIPL. ING.

ZAGREB, 2006.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

PROJEKTNE PROCEDURE I MATEMATIČKI MODELI U OSNIVANJU BRODOVA PUNE FORME

MAGISTARSKI RAD

MENTOR:

PROF. DR. SC. VEDRAN ŽANIĆ

PREDRAG ČUDINA, DIPL. ING.

ZAGREB, 2006.

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU:

UDK:	629.5.01:519.8
Ključne riječi:	Projektiranje, optimizacija, tanker, bulk carrier
Znanstveno područje:	TEHNIČKE ZNANOSTI
Znanstveno polje:	Brodogradnja
Institucija u kojoj je rad izrađen:	Fakultet strojarstva i brodogradnje
Mentor rada:	Prof. dr. sc. Vedran Žanić
Broj stranica:	119
Broj slika:	32
Broj tablica:	10
Broj korištenih bibliografskih jedinica:	27
Datum obrane:	09.10.2006.
Povjerenstvo:	Dr. sc. Izvor Grubišić, red. prof. - predsjednik povjerenstva Dr. sc. Vedran Žanić, red. prof. - voditelj magistarskog rada Dr. sc. Ivo Senjanović, Akademik - član povjerenstva Dr. sc. Božo Vranješ, red. prof. - član povjerenstva Dr. sc. Igor Belamarić, u mirovini - član povjerenstva
Institucija u kojoj je rad pohranjen:	Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Poslijediplomski znanstveni studij
Smjer brodogradnja i pomorska tehnika

Zagreb, 2002-01-08

Zadatak za magistarski rad

Kandidat: PREDRAG ČUDINA, dipl. inž. brodogradnje

Naslov zadatka: **Projektne procedure i matematički modeli u osnivanju brodova pune forme**

Sadržaj zadatka:
Razviti prikladne procedure i matematičke modele za osnivanje brodova pune forme. Projektne procedure trebaju uključiti konceptualnu i preliminarnu fazu osnivanja broda. Matematičke modele treba razraditi na nivou konceptualnog projekta. Prikladna optimizacijska procedura treba biti izabrana za konceptualnu fazu. Projektne procedure i matematički modeli trebaju biti testirani na praktičnim primjerima osnivanja broda.

Rad treba sadržavati:

- uvod: osnovna svojstva trgovačkih brodova pune forme: podjelu trgovačkih brodova pune forme, specifičnosti osnivanja pojedinih tipova, međunarodnu regulativu i zahtjeve klasifikacijskih društava;
- projektne procedure u osnivanju trgovačkih brodova pune forme;
- matematičke modele osnivanja trgovačkih brodova pune forme;
- metode optimiranja u osnivanju trgovačkih brodova pune forme;
- primjere osnivanja: osnivanje tankera odabrane veličine, osnivanje bulk-carriera odabrane veličine, usporedbu s suvremenim brodovima i komentar;
- zaključak.

Zadatak zadan: 15. 01. 2002.

Rad predan: 08. 09. 2006

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE SVEUČILIŠTA U ZAGREBU POSTDIPLOMSKA NASTAVA

Mentor:	Predsjednik Odbora za poslijediplomske studije:	Voditelj smjera
Prof.dr.sc. Vedran Žanić	Prof.dr.sc. Božo Vranješ	Prof.dr.sc. Vedran Žanić

ZAHVALA

Prvenstveno se zahvaljujem svom mentoru, prof. dr. Vedranu Žaniću na poticaju za izradu ovog rada i konstantnoj podršci koju mi je pružao prilikom izrade. Obzirom da sam ovaj rad radio tijekom perioda vrlo napornog angažmana na radnom mjestu, njegovo dovršenje ne bi bilo moguće bez njegovog stalnog pozitivnog utjecaja i podstreka.

Zahvaljujem se Ani Bezić, dipl.ing. i Petru Prebegu, dipl.ing. na vrijednoj i nesebičnoj pomoći pri izradi rada.

SADRŽAJ

KLJUČNE RIJEČI 1

PREDGOVOR 2

SAŽETAK....4

SUMMARY 5

POPIS OZNAKA I KRATICA 6

POPIS SLIKA 9

POPIS TABLICA....11

1. UVOD 12

2. OSNOVNA SVOJSTVA TRGOVAČKIH BRODOVA PUNE FORME....15

3. PODJELA TRGOVAČKIH BRODOVA PUNE FORME 17

4. SPECIFIČNOSTI OSNIVANJA POJEDINIH TIPOVA BRODOVA....19
4.1. Osnivanje brodova za prijevoz rasutih tereta 19
4.2. Osnivanje brodova za prijevoz tekućih tereta 23

5. MEĐUNARODNA REGULATIVA I ZAHTJEVI KLASIFIKACIJSKIH DRUŠTAVA 27
5.1. Pravila i propisi izdani od "International Maritime Organization" 27
5.2. Pravila klasifikacijskih društava za gradnju brodova....34
5.3. Propisi za plovidbu kanalima 37
5.3.1. Kanal Sv. Lovrijenca....37
5.3.2. Panamski kanal....37
5.3.3. Sueski kanal....38

6. PROJEKTNE PROCEDURE U OSNIVANJU TRGOVAČKIH BRODOVA PUNE FORME....39
6.1. Opća projektna procedura 40

6.1.1. Definicija projektnog zadatka 42
6.1.1.1. Projektne varijable i parametri 42
6.1.1.2. Projektna ograničenja 43
6.1.1.3. Zavisna projektna svojstva (atributi) 43
6.1.1.4. Projektni ciljevi 44
6.1.2. Variranje projektnih varijabli i provjera ograničenja 44
6.1.3. Proračun visine broda i minimalnog nadvođa 44
6.1.4. Proračun minimalne snage porivnog stroja 45
6.1.5. Proračun vlastite mase i istisnine 45
6.1.6. Proračun cijene broda 45
6.2. Posebne projektne procedure 47

7. MATEMATIČKI MODELI OSNIVANJA TRGOVAČKIH BRODOVA PUNE FORME 49
7.1. Definicija projektnog zadatka 49
7.1.1. Projektne varijable i parametri 49
7.1.2. Projektna ograničenja 50
7.1.3. Zavisna projektna svojstva (atributi) 55
7.1.4. Projektni ciljevi 56
7.2. Variranje projektnih varijabli i provjera ograničenja 57
7.3. Proračun visine broda i minimalnog nadvođa 57
7.4. Proračun minimalne snage porivnog stroja 58
7.5. Proračun vlastite mase i istisnine 58
7.6. Proračun cijene broda 63
7.6.1. Proračun cijene materijala 63
7.6.2. Proračun cijene rada (procesa) 64
7.6.3. Preostali troškovi 65

8. METODE OPTIMIRANJA U OSNIVANJU TRGOVAČKIH BRODOVA PUNE FORME 66
8.1. Osnovni opis primijenjene metode optimiranja 66
8.1.1. Određivanje preferencija među pojedinim atributima 67
8.1.2. Određivanje preferencija unutar pojedinog atributa 69
8.2. Identifikacija projektnog problema primjenom metode višeatributne sinteze projekta u optimiranju projekta broda 71
8.2.1. Projektne varijable i parametri 71
8.2.2. Projektna ograničenja 71
8.2.3. Zavisna projektna svojstva (atributi) 72
8.2.4. Projektni ciljevi 74

9. PRIMJERI OSNIVANJA BULK CARRIERA I TANKERA 75
9.1. Osnivanje Capesize bulk carriera 75
9.1.1. Pregled suvremenih Capesize bulk carriera 75
9.1.2. Projektni zahtjev 76
9.1.3. Identifikacija projektnog zadatka 76
9.1.3.1. Projektne varijable i parametri 76
9.1.3.2. Projektna ograničenja 77
9.1.3.3. Zavisne projektne veličine (atributi) 78
9.1.3.4. Projektni ciljevi 81
9.1.4. Približni proračun minimalnog nadvođa 81
9.1.5. Proračun minimalne snage porivnog stroja 82
9.1.6. Proračun cijene broda 83
9.1.7. Prikaz i diskusija rezultata 84
9.2. Osnivanje Handymax product tankera 95
9.2.1. Pregled suvremenih Handymax product tankera 95
9.2.2. Projektni zahtjev 96
9.2.3. Identifikacija projektnog zadatka 96
9.2.3.1. Projektne varijable i parametri 96
9.2.3.2. Projektna ograničenja 97
9.2.3.3. Zavisne projektne veličine (atributi) 98
9.2.3.4. Projektni ciljevi 101
9.2.4. Približni proračun minimalnog nadvođa 101
9.2.5. Proračun minimalne snage porivnog stroja 102
9.2.6. Proračun cijene broda 103
9.2.7. Prikaz i diskusija rezultata 104

10. ZAKLJUČAK 114

LITERATURA 116

KRATKI ŽIVOTOPIS 119

KLJUČNE RIJEČI

Projektiranje, optimizacija, tanker, bulk carrier

KEY WORDS

Design, optimisation, tanker, bulk carrier

PREDGOVOR

Tijekom niza godina razvoj trgovačkih brodova ide u smjeru dosezanja sve većih korisnih nosivosti. Pri tome se ne povećavaju osnovne brodske izmjere, niti se smanjuje brzina broda. Razlog ovog trenda, koji se često protivi osnovnim projektantskim uvjerenjima, leži u komercijalnim rezultatima operiranja broda. Jednostavno rečeno, brodovi pune forme, koristeći veću nosivost, donose pomorskoj kompaniji veću zaradu. U tom je smislu na djelu pravo natjecanje u projektiranju i gradnji brodova takvih korisnih nosivosti kakve su donedavno bile nezamislive. U ostvarenju zadanog cilja projektantu su na raspolaganju svega dvije mogućnosti: smanjenje vlastite mase broda i izbor brodske forme visokog koeficijenta punoće.

Ovakav je razvoj trgovačkih brodova pune forme, prvenstveno brodova za prijevoz rasutih tereta i tankera, započeo prije tridesetak godina u japanskim brodogradilištima. Nešto kasnije su im se pridružila koreanska brodogradilišta, a zatim i sva druga koja pokušavaju biti konkurentna u gradnji ovih brodova. Veličina i snaga dalekoistočnih brodogradilišta uvjetuje i organizaciju razvoja vlastitih projekata. Dok brodogradilišta grade "serijske" novogradnje s minimalnim mogućnostima modificiranja tijekom gradnje, paralelno se razvija nova generacija "standardnog" projekta koji će, kad bude potpuno razrađen, zamijeniti onog prethodne generacije. Ti su projekti dovedeni do samih granica aktualnih tehničkih saznanja, pa im je vrlo teško konkurirati.

Razvoj se projekta u manje snažnim brodogradilištima, pa tako i u hrvatskim, bitno razlikuje od dalekoistočnog modela. Pokušavajući izraditi projekte brodova prema specifičnim zahtjevima brodovlasnika, projekti se u manjem opsegu, konceptualnom i dijelom preliminarnom, definiraju prije potpisivanja brodograđevnog ugovora. Dovršenje i razrada projekta je ostavljena za poslijeugovornu fazu, pa se preklapa s pripremnim aktivnostima za gradnju broda, a često i sa samom gradnjom.

U toj je situaciji projektantima na raspolaganju vrlo kratko vrijeme. Osnovne se projektne postavke često ne mogu potvrditi u predugovornoj fazi, pa su projektanti prisiljeni projektirati s izvjesnim rizikom. Da bi se taj rizik minimizirao nužno je osloniti projekt u konceptualnoj i preliminarnoj fazi na kvalitetne projektne procedure i adekvatne matematičke modele.

Stoga je od najveće važnosti razvoj projektnih metoda i primjena suvremenih optimizacijskih tehnika u svim fazama razvoja projekta broda. Bez konstantnog razvoja nije moguće zadržati položaj jedne od vodećih zemalja u razvoju brodograđevne projektantske misli, što je nužan

preduvjet održanja naših brodogradilišta na sve konkurentnijem svjetskom brodograđevnom tržištu.

Taj se cilj može ostvariti samo stalnim razvojem i razmjenom iskustava i misli svih brodograđevnih centara: brodogradilišta, znanstvenih ustanova i brodograđevnih institucija. Skroman doprinos tome cilju u smislu poboljšanju projektne baze i primjene optimizacijskih postupaka u osnivanju brodova pune forme je namjena i ovog rada.

SAŽETAK

U radu se razvijaju projektne procedure i matematički modeli za osnivanje trgovačkih brodova pune forme. Posebna je pozornost posvećena dvama dominantnim skupinama ovakvih brodova: brodovima za prijevoz rasutih tereta i brodovima za prijevoz tekućih tereta (tankerima).

Izložena projektna procedura je zajednička za obje skupine i može se primijeniti u postupku osnivanja broda različitim metodama: od najjednostavnijih metoda priručnim alatima do suvremenih složenih optimizacijskih metoda i postupaka. Izložena procedura uključuje ne samo mogućnost optimiranja osnovnih izmjera broda, već i komercijalnih efekata gradnje broda.

Prezentirani matematički model osnivanja broda se osniva na dugogodišnjem projektantovom iskustvu. Iz preko 150 izvedenih projekata i preko 40 izgrađenih novogradnji u Brodogradilištu Brodosplit je selektiran veliki broj podataka o brodovima. Zasnovano na tim podacima su dane preporuke za projektiranje koje su prikazane slikama i dijagramima.

Kao optimizacijska metoda je primijenjena metoda višeatributne sinteze projekta. Programska aplikacija predmetne metode je razvijena na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Projektnim atributima su pridružene pripadne neizrazite funkcije. Relativni odnosi značaja među pojedinim projektnim atributima su definirani matricom subjektivnih relativnih preferencija u skladu sa Saaty-evom metodom.

Izloženi su i komentirani primjeri osnivanja dvaju brodova korištenjem opisane projektne metode i pripadnih matematičkih modela: broda za prijevoz rasutih tereta Capesize veličine i tankera za prijevoz naftnih derivata Handymax veličine. Rezultat primijenjene optimizacijske procedure je određeni broj nedominiranih efikasnih rješenja. Odabir projektnog rješenja je projektantova odluka osnovana na njegovim subjektivnim preferencijama.

SUMMARY

DESIGN PROCEDURES AND MATHEMATICAL MODELS IN THE BASIC DESIGN OF THE HIGH BLOCK COEFFICIENT SHIPS

This work deals with design procedures and mathematical models applicable in initial design of merchant ships with high block coefficient. Special attention has been paid to two dominant ships' groups: bulk carriers and tankers.

Presented design procedure is common for both groups and it can be applied using various application techniques: from the simplest handy methods to the most sophisticated optimisation methods and techniques. Presented procedure includes optimisation of main ship's characteristics as well as optimisation of commercial effects of newbuildings.

Mathematical models are based on designer's long-time work experience. Large number of data have been derived from more than 150 executed designs and more than 40 ships built in Shipyard Brodosplit. Recommendations for execution of design are shown in number of pictures and diagrams and are based on collected data and work experience.

A multiatribute decision making method has been applied. Computer optimisation program developed at Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb has been applied. Each attribute was defined through membership grade function based on the fuzzy set theory. The consistent relative significance of attributes is obtained as a normalised eigenvector of the subjective decision making matrix and used as the weighting factor according to Saaty’s method.

Two examples of design procedure are shown and commented: optimisation of design of Capesize Bulk Carrier and Handymax Product Tanker. Result of optimisation procedure is number of nondominated efficient solutions. Preferred solution is one of selected among them when designer preferences are completely revealed.

POPIS OZNAKA I KRATICA

A	postignuti indeks pregrađivanja
b_i	minimalna udaljenost teretnog tanka do boka broda, m
B	širina broda, m
c_{st}	jedinična cijena čelika, USD/t
C	stupanj konzistentnosti
C_B	koeficijent punoće, blok koeficijent
C_{BD}	koeficijent punoće na visini broda na boku
$C_{B\ 0.85D}$	koeficijent punoće na 85% visine broda na boku
C_{CB}	korekcija nadvođa za koeficijent punoće
C_D	korekcija nadvođa za visinu broda na boku, mm
C_i	volumen oštećenog centralnog teretnog tanka, m^3
C_{fix}	cijena preostalog materija i opreme, MUSD
C_k	korekcija nadvođa za kaštel, mm
C_L	cijena rada (procesa), MUSD
C_M	cijena materijala, MUSD
C_{ME}	cijena porivnog stroja, MUSD
C_{NB}	cijena novogradnje, MUSD
C_{pr}	korekcija nadvođa za palubni skok, mm
C_{st}	cijena čelika, MUSD
CSR	trajna snaga u službi, kW
d_s	maksimalni gaz, m
d_m	minimalni balastni gaz na sredini broda, m
D	visina broda na boku, m
DW	korisna nosivost, t
f_c	faktor kompenzacije
f_1	faktor utjecaja upotrebe čelika povišene čvrstoće na smanjenje mase čelične konstrukcije
f_2	iskustveni faktor za proračun mase čelične konstrukcije
f_3	dodatak za masu nadgrađa, kaštela, krmice, klasu leda, i sl, t
f_4	iskustveni faktor za proračun mase strojo opreme
f_5	odnos CSR-a i SMCR-a
f_6	iskustveni faktor za proračun mase preostale opreme
f_7	dodatak za masu brodske opreme specifične za pojedini projekt, t
freeb	minimalno nadvođe, m
F_A	minimalno A nadvođe, mm
F_{B-60}	minimalno sniženo (B-60) nadvođe, mm

F_{tA}	tablično A nadvođe, mm
F_{tB}	tablično B nadvođe, mm
F_{tB-60}	sniženo tablično (B-60) nadvođe, mm
GT	bruto tona
GZ_{max}	maksimalna pozitivna poluga stabiliteta unutar opsega stabiliteta, m
h	visina dvodna, m
I	jedinična matrica
I_{ME}	identifikator porivnog stroja
IACS	Međunarodno udruženje klasifikacijskih društava
ICLL	Međunarodna konvencija o teretnim linijama
IMO	Međunarodna pomorska organizacija
ITTC	Međunarodna konferencija laboratorija za ispitivanje modela
l_c	prostiranje po duljini kod oštećenja broda po boku, m
l_s	prostiranje po duljini kod oštećenja broda po dnu, m
L	duljina broda, m
L_F	duljina broda za potrebe proračuna minimalnog nadvođa, m
L_{pp}	duljina broda između perpendikulara, m
LNG	ukapljeni prirodni plin
LPG	ukapljeni petrolejski plin
LS	vlastita masa broda, t
MARPOL	Međunarodna konvencija o sprječavanju onečišćenja mora s brodova
MCR	maksimalna trajna snaga, kW
NA	broj atributa
O_c	hipotetsko istjecanje tereta u slučaju oštećenja broda po boku, m^3
O_s	hipotetsko istjecanje tereta u slučaju oštećenja broda po dnu, m^3
OECD	Organizacija za gospodarsku suradnju i razvoj
p	vektor značaja atributa
p_i	značaj atributa i
p_i	vjerojatnost naplavljivanja odjeljka ili skupine odjeljaka
P	matrica subjektivnih relativnih preferencija
P_{cGT}	proizvodnost brodogradilišta, rs/cGT
P_{ij}	međusobni odnos značaja dvaju atributa
P_{pt}	preostali troškovi, MUSD
R	zahtijevani indeks pregrađivanja
s_i	vjerojatnost prebrođenja nakon naplavljivanja odjeljka ili skupine odjeljaka
SMCR	selektirana maksimalna trajna snaga, kW
SOLAS	Međunarodna konvencija o zaštiti ljudskih života na moru
SSPA	Švedski pomorski istraživački centar
t_c	prostiranje po širini kod oštećenja broda po boku, m

t_s	prostiranje po širini kod oštećenja broda po dnu, m
U(y(x))	subjektivna mjera zadovoljenja atributa y
v_c	prostiranje po visini kod oštećenja broda po boku, m
v_s	prostiranje po visini kod oštećenja broda po dnu, m
v_{tr}	brzina na pokusnoj plovidbi, čv
V	ukupni zatvoreni volumen broda, m^3
V_{car}	volumen teretnog prostora, m^3
V_k	volumen kaštela, m^3
V_{nad}	volumen nadgrađa, konstrukcije ispod dimnjaka, grotala tereta i poklopaca, m^3
V_{pr}	volumen preluka, m^3
V_{reb}	volumen trupa broda do visine na boku, m^3
V_L	jedinična satnica, USD/rs
VLCC	„vrlo veliki“ tanker za prijevoz sirovog ulja (nosivosti oko 300000 dwt)
w	minimalna širina dvoboka, m
W_{gst}	bruto masa čelika, t
W_i	volumen oštećenog bočnog teretnog tanka, m^3
W_m	masa strojo opreme, t
W_o	masa ostale opreme, t
W_{st}	masa čelične konstrukcije, t
x_b	duljina pramčanog bulba, m
x_c	udaljenost od pramčanog perpendikulara, m
x_r	redukcija zbog pramčanog bulba, m
γ_{tot}	specifična masa morske vode s uključenim utjecajem oplate broda i privjesaka, t/m^3
θ_e	konačni ravnotežni kut nagiba oštećenog broda, ^{o}
κ	„specifična voluminoznost broda“
λ_i	vlastite vrijednosti problema

POPIS SLIKA

Slika br. 1. Tipični poprečni presjek broda za prijevoz rudače.....20

Slika br. 2. Tipični poprečni presjek broda za prijevoz rasutih tereta.....22

Slika br. 3. Tipični poprečni presjek tankera za prijevoz sirove nafte.....24

Slika br. 4. Tipični poprečni presjek tankera za prijevoz naftnih derivata.....25

Slika br. 5. Projektna spirala osnivanja trgovačkih brodova.....39

Slika br. 6. Blok shema opće projektne procedure.....41

Slika br. 7. Preporučene maksimalne vrijednosti koeficijenta punoće.....52

Slika br. 8. Preporučena ograničenja L_{pp}/B.....53

Slika br. 9. Preporučena ograničenja L_{pp}/d_s.....54

Slika br. 10. Preporučena ograničenja B/d_s.....54

Slika br. 11. Preporučena ograničenja L_{pp}/D.....55

Slika br. 12. Faktor f_2 (brodovi za prijevoz rasutih tereta).....59

Slika br. 13. Faktor f_2 (tankeri).....60

Slika br. 14. Faktor f_4 (brodovi za prijevoz rasutih tereta).....61

Slika br. 15. Faktor f_4 (tankeri).....61

Slika br. 16. Faktor f_6 (brodovi za prijevoz rasutih tereta).....62

Slika br. 17. Faktor f_6 (tankeri).....63

Slika br. 18. Opći oblik neizrazite funkcije ("Ω" oblik).....69

Slika br. 19. "U", "S" i "Z" oblik neizrazitih funkcija....70

Slika br. 20. Projektni problem....70

Slika br. 21. Grafički prikaz preferencija....80

Slika br. 22. Optimalni nedominirani projekti....86

Slika br. 23. Optimalni nedominirani projekti....88

Slika br. 24. Optimalni nedominirani projekti....90

Slika br. 25. Optimalni nedominirani projekti....91

Slika br. 26. Subjektivno odlučivanje putem paralelnih osi....93

Slika br. 27. Grafički prikaz preferencija....100

Slika br. 28. Optimalni nedominirani projekti....105

Slika br. 29. Optimalni nedominirani projekti....107

Slika br. 30. Optimalni nedominirani projekti....109

Slika br. 31. Optimalni nedominirani projekti....110

Slika br. 32. Subjektivno odlučivanje putem paralelnih osi....112

POPIS TABLICA

Tablica br. 1. Broj poprečnih pregrada 35

Tablica br. 2. Ograničenja izmjera broda za prolaz Sueskim kanalom (izvaci).....38

Tablica br. 3. Faktori kompenzacije prema OECD-u (izvadak) 64

Tablica br. 4. Definicija odnosa među atributima.....67

Tablica br. 5. Suvremeni Capesize bulk carrieri 75

Tablica br. 6. Zadane preferencije među atributima 78

Tablica br. 7. Zadane neizrazite funkcije 79

Tablica br. 8. Suvremeni Handymax product tankeri 95

Tablica br. 9. Zadane preferencije među atributima 98

Tablica br. 10. Zadane neizrazite funkcije 99

1. UVOD

Osnovni cilj ovog rada je davanje sustavnog i preglednog prikaza procesa konceptualnog projektiranja brodova koji predstavljaju dominantnu skupinu u ukupnoj svjetskoj trgovačkoj mornarici. U radu prikazan projektni postupak osnivanja brodova visokog blok koeficijenta, prvenstveno suvremenih brodova za prijevoz rasutih tereta i tankera. Izloženi projektni model je moguće primijeniti u širokom spektru projektnih zadataka i sa različitim tehnikama rada.

Primijenjeni projektni postupak se nadograđuje, sustavno prikazuje i proširuje prethodno objavljene projektne modele [7,8,9,10,11,12,13,14,15].

U početnom poglavlju se kratko opisuju osnovna zajednička svojstva trgovačkih brodova pune forme, odnosno temeljni elementi koji dominantno utječu na postupak osnivanja. Sažeto su opisani uzroci koji vode odabiru punih brodskih formi, međusobni utjecaji i uzročno-posljedične veze pojedinih utjecajnih faktora i elemenata broda te načini rješavanja osnovnih problema.

Narednim poglavljem je prikazana osnovna podjela trgovačkih brodova visokog blok koeficijenta, te su popisane osnovne karakteristike dviju dominantnih skupina: brodova za prijevoz rasutih tereta ("bulk carrier-a") i brodova za prijevoz tekućih tereta ("tankera").

Idućom cjelinom su detaljno opisane specifičnosti kod osnivanja ovih dviju dominantnih skupina, naslanjajući se na već objavljene radove [14,25,26] te ih preciznije definiraju.

Brodovi za prijevoz rasutih tereta su podijeljeni u dvije prevladavajuće skupine: brodove za prijevoz rudače i brodove za prijevoz lakših sipkih tereta. Slikama su prikazani njihovi tipični poprečni presjeci, te opisane osnovne karakteristike. Kratko su opisani tereti koje prevoze i pojedinosti vezane uz njihov prijevoz, te osnovne postavke koje određuju osnivanje ove vrste brodova.

Tankeri su podijeljeni na brodove za prijevoz specijalnih tekućih tereta, brodove za prijevoz pothlađenih ili visoko zagrijanih tekućih tereta, brodove za prijevoz kemikalija i na brodove za prijevoz sirove nafte i naftnih derivata. Kratko su opisane sve skupine. Slikama su prikazani tipični poprečni presjeci dominantnih skupina: tankera za prijevoz sirove nafte i tankera za prijevoz naftnih derivata i blažih kemikalija. Opisani su osnovni uvjeti koji utječu na osnivanje ovih skupina.

Naredno poglavlje se bavi međunarodnom regulativom i zahtjevima klasifikacijskih društava koji se odnose na predmetne tipove brodova [1,2,3,4,5,6]. Sažeto su prikazana osnovna pravila SOLAS-a koja definiraju zahtjeve za pregrađivanje i stabilitet, osnovna pravila MARPOL-a koja se odnose na konfiguraciju teretnog prostora tankera i zahtjeve stabiliteta, pravila ICLL-a za proračun minimalnog nadvođa te elementarni zahtjevi klasifikacijskih društava koji utječu na osnovnu konfiguraciju broda. Ukratko su prikazana pravila i ograničenja triju najznačajnijih kanala: Sueskog, Panamskog i Kanala Sv. Lovrijenca.

U šestom poglavlju je opisana opća projektna procedura osnivanja ovih tipova brodova i prikazana je priloženom blok shemom. Izložena procedura je općenita i može se koristiti u različite svrhe: od provjere pojedinog projektnog rješenja najjednostavnijim alatima [9,10,11,12] do korištenja kao osnovnog algoritma matematičkog modela osnivanja broda u optimizacijskim postupcima [7,8,13,15]. Također je kratko opisan i komentiran tradicionalni postupak projektiranja pomoću tzv. "projektne spirale".

Slijedećim poglavljem su prikazani detaljni matematički modeli osnivanja trgovačkih brodova pune forme. Definirani su osnovni ulazni podaci i njihova podjela. Grafičkim prikazima su izložena subjektivne projektantove preporuke i ograničenja. Također su popisani i obrazloženi kriteriji koji mogu dominantno utjecati na odabir optimalnog projekta. Kao pomoć u izračunu masa pojedinih skupina koje značajno utječu na ukupnu vlastitu masu broda prikazane su iskustvene projektantove baze podataka za pojedine tipove i veličine brodova.

Osmim poglavljem je kratko opisana primijenjena metoda višeatributnog optimiranja. Programska aplikacija je razvijena na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu i poslužila je kao optimizacijska ljuska za provedbu proračuna matematičkog modela postupka osnivanja odabranih primjera [18,19,20,21,22,23,24].

Identificirani su svi elementi projektnog problema u skladu s primijenjenom optimizacijskom metodom. Komentirane su pojedine projektne veličine i obrazložene projektantske preporuke za njihovu definiciju.

Nakon toga slijedi poglavlje u kojem su prikazani konkretni matematički modeli osnivanja dvaju odabranih tipova i veličina broda: Capesize bulk carrier-a i Handymax product tankera. Prikazani su podaci o suvremenim brodovima izgrađenim u brodogradilištima specijaliziranim za gradnju ovakvih brodova.

Definirani su projektni zahtjevi temeljem kojih su identificirani pojedini projektni zadaci. Detaljno su definirani matematički modeli za oba tipa broda. Priložene su slike izlaznih rezultata, komentari pojedinih slika i sinteza čitavog primijenjenog projektnog postupka.

Opisane su uočene zakonitosti i međusobni odnosi pojedinih veličina koje značajno utječu na postignute rezultate.

Završno, deseto poglavlje su zaključna razmatranja ovog rada. Komentiran je primijenjeni postupak, uspoređen je s projektiranjem tradicionalnim metodama, opisane moguće prednosti u dnevnoj brodograđevnoj praksi, te su na kraju izložene sugestije za daljnji razvoj i unapređenje izložene metodologije.

2. OSNOVNA SVOJSTVA TRGOVAČKIH BRODOVA PUNE FORME

Osnovna svojstva trgovačkih brodova pune forme se očituju u visokim koeficijentima punoće (C_B), u pravilu višim od 0.80 pa do najviših 0.89; umjerenim brzinama karakteriziranim Froude-ovim brojem 0.15 do 0.20; "teškim" poljima sustrujanja u ravnini djelovanja vijka; povećanim stupnjem opasnosti obzirom na odvajanje strujanja u okolici vijka, visokim odnosom volumena teretnog prostora prema ukupnom volumenu broda; umjerenim snagama porivnih strojeva; kratkim strojarnicama s negativnim posljedicama na konstrukciju propulzijskog sustava te naposljetku visokom ekonomičnošću u službi. Posljednji od navedenih svojstava je dominantan i uzrokom je stalnog unapređivanja i usavršavanja tehničkih rješenja prethodno navedenih problema i svojstava.

Karakteristika punih brodskih formi je "teško" polje sustrujanja u ravnini djelovanja vijka, odnosno visoki "wake". Ta se situacija stalno popravlja razvojem novih generacija brodskih formi kojima se teži popraviti polje sustrujanja ne smanjujući pri tome koeficijent punoće brodske forme [9,10,11,12].

Današnje se brodske forme odlikuju u krmenom dijelu izraženim krmenim bulbom, odnosno izraženim "U" tipom (gondola) krmenih rebara. Time se blagim usporavanjem prosječnog sustrujanja dobiva ravnomjernije polje sustrujanja, a time i ravnomjernije, lakše i djelotvornije djelovanje brodskog vijka. Dovodeći veću količinu vode u gornji dio polja djelovanja vijka, ovim se formama smanjuje opasnost od odvajanja strujanja i neurednog djelovanja brodskog vijka. Naravno, postoji i niz neželjenih popratnih posljedica, kao što su skučenost brodske strojarnice, loša pomorstvena svojstva kod valova u krmu, složenija konstrukcijska rješenja krme.

U današnjem su vremenu trgovački brodovi pune forme pretežno brodovi za prijevoz rasutih tereta i brodovi za prijevoz tekućih tereta (tankeri). Oba tipa brodova se odlikuju sličnim brodskim formama, s tim da tankeri, kao prijevoznici kvalitetnijeg (skupljeg) tereta, redovno dosižu nešto više brzine, odnosno Froude-ove brojeve. Iako su, obzirom na vrstu tereta, opću konfiguraciju broda i relevantnu regulativu, ovi tipovi brodova potpuno različiti, svojstvene su im i neke zajedničke karakteristike [14,25,26].

Oba tipa broda imaju dominantne zahtjeve za visokom voluminoznošću teretnog prostora. Također oba tipa imaju, u pravilu, narinuta ograničenja glavnih izmjera broda, bilo Velikih jezera, Panamskog kanala, Sueskog kanala ili pojedinih luka. Iako se ovi brodovi strukturno bitno razlikuju, kod oba je tipa uzdužna čvrstoća i struktura dominantno zavisna od istih stanja krcanja.

Navedena svojstva i problemi u projektiranju brodova pune forme su samo posljedica uvjeta, odnosno svojstva - visoke komercijalne vrijednosti ovakvih brodova u službi. Usporedba prethodnih generacija brodova standardne veličine sa današnjim projektima jasno pokazuje razvojni trend prema sve punijim brodskim formama. Uvijek otvoreno pitanje ostaje: gdje su krajnje granice i koliko smo im blizu.

3. PODJELA TRGOVAČKIH BRODOVA PUNE FORME

Dvije su dominantne skupine među trgovačkim brodovima pune forme: brodovi za prijevoz rasutih tereta (bulk carrieri) i brodovi za prijevoz tekućih tereta (tankeri).

Brodske forme visokog koeficijenta punoće primjenjujemo i kod pojedinih specifičnih projekata trgovačkih brodova drugih namjena (kad su osnovne izmjere čvrsto ograničene, a zahtjev za brzinom nije jako izražen) te kod nekih specijaliziranih brodova (npr. brodovi za jaružanje). Kako ovakvi specifični brodovi predstavljaju mali dio svjetske flote, a osim toga im se zbog posebnosti svakog pojedinog projekta teško mogu naći zajednička opća svojstva, nadalje će se razmatrati samo dvije prevladavajuće skupine:

- brodovi za prijevoz rasutih tereta,
- brodovi za prijevoz tekućih tereta.

Brodove za prijevoz rasutih tereta karakteriziraju slijedeća osnovna svojstva:

- visoki koeficijent punoće,
- umjerena brzina,
- jedna (glavna) paluba,
- velika voluminoznost teretnih skladišta (iznimka su brodovi specijalizirani za prijevoz teških ruda),
- kratka strojarnica i pikovi,
- nadgrađe i strojarnica smješteni na krmi,
- nadvođe minimalno ili sniženo,
- vertikalno korugirane poprečne pregrade (samo iznimno dvoplošne),
- velika palubna grotla (širina grotala jednaka ili veća od poluširine broda),
- specifičan poprečni presjek s dvodnom, uzvojnim i potpalubnim tankovima (očekuje se reguliranje zahtjeva za dvostrukom oplatom boka).

Osnovna svojstva brodova za prijevoz tekućih tereta su slijedeća:

- visoki koeficijent punoće,
- viša brzina,
- jedna (glavna) paluba,
- velika voluminoznost teretnih tankova,
- kratka strojarnica i pikovi,
- nadgrađe i strojarnica smješteni na krmi,

- višak nadvođa u odnosu na minimalne zahtjeve,
- pregrade u teretnom prostoru ravne ili korugirane (ovisno o veličini broda i "kvaliteti" tereta),
- palubna struktura ispod ili iznad palube (ovisno o veličini broda i "kvaliteti" tereta),
- poprečni presjek s dvodnom i dvobokom.

4. SPECIFIČNOSTI OSNIVANJA POJEDINIH TIPOVA BRODOVA

Izložena podjela brodova za prijevoz rasutih tereta i brodova za prijevoz tekućih tereta, te specifičnosti osnivanja pojedinih skupina se temelji na autorovom projektantskom iskustvu te na relevantnoj literaturi [14,25,26].

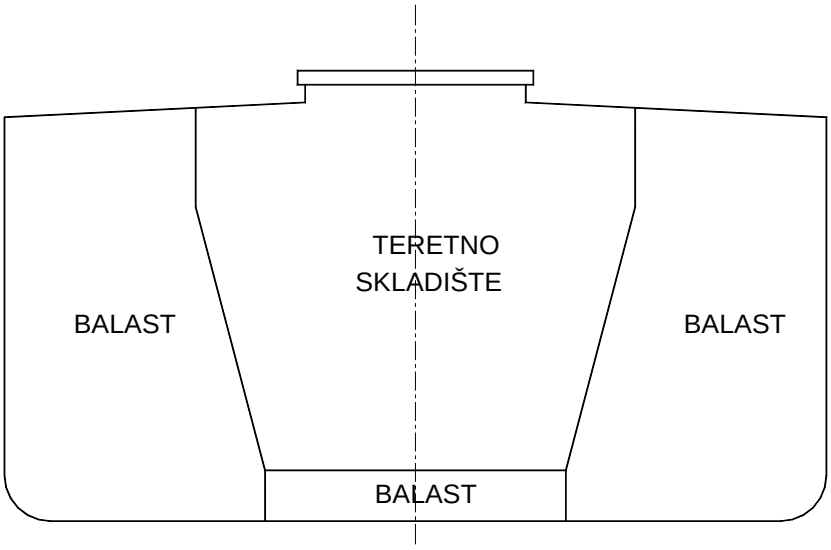
4.1. Osnivanje brodova za prijevoz rasutih tereta

Suvremene brodove za prijevoz rasutih tereta možemo generalno podijeliti u dvije prevladavajuće skupine:

- brodove za prijevoz rudače i ostalih teških sipkih tereta;
- brodove za prijevoz lakših rasutih tereta (žitarice, lakše rudače).

Za prvu je skupinu brodova svojstvena velika specifična masa namijenjenih tereta, pa time i uska specijalizacija. Traženi volumen teretnih skladišta je relativno nizak u odnosu na masu tereta. To je uzrok da zadovoljenje minimalnog volumena uzgona broda vodi ka velikom volumenu balastnih tankova. U pravilu je dovoljno zadovoljiti uvjet sniženog minimalnog nadvođa. Velika specifična masa tereta uzrokuje nisko težište broda u nakrcanom stanju, odnosno "prestabilan" brod s krutim držanjem na valovima. Akceleracije koje bi se pri tome javljale su neprimjerene za trajni kvalitetni boravak posade na brodu i za uredno funkcioniranje i održavanje pojedine brodske opreme. Opisani se problem rješava podizanjem težišta tereta.

U tom se smislu susreću dvije moguće izvedbe: povećanje visine dvodna iznad minimalno zahtijevane (bilo od propisa klasifikacijskih društava, uvjeta za minimalnim volumenom balastnih tankova ili rezultata optimiranja brodske strukture) i/ili prilagodba geometrije teretnih skladišta s ukošenim uzdužnim pregradama. Zbog svoje uske specijalizacije relativno su rijetki i u pravilu su velike nosivosti ("capesize" veličine). Tipičan poprečni presjek broda za prijevoz rudače je prikazan sljedećom slikom.



Slika br. 1. Tipični poprečni presjek broda za prijevoz rudače

Oni brodovi koje danas uobičajeno nazivamo "bulkerima" ili brodovima za prijevoz rasutih tereta su brodovi ranije navedene druge skupine. Dominantni su brojem nad prvom skupinom, univerzalniji su i njima je moguće, komercijalno uspješno, prevoziti veliki broj različitih rasutih, pa i neke komadne terete.

Iako im veliki volumen teretnih skladišta omogućava prijevoz relativno laganih tereta na maksimalnom gazu (specifične mase najčešće od oko 0.8 kg/m^3), suvremeni "bulkeri" uspješno prevoze i vrlo teške terete. U takvim se slučajevima teret alternativno krca u pojedina, posebno pojačana skladišta. Alternativno krcanje se najčešće vrši u neparna skladišta, odnosno skladišta br. 1, 3 i 5 kod "handy" veličine, 1, 3, 5 i 7 kod "laker" i "panamax" veličine, odnosno 1, 3, 5, 7 i 9 kod "capesize" veličine.

Kod krcanja vrlo laganih tereta, posebice drvene građe, volumen teretnih skladišta nije dovoljno velik da bi se brod mogao natovariti do maksimalnog gaza. U tom se slučaju teret često dodatno krca na otvorenu palubu. Palubni teret se učvršćuje posebnom opremom - bočnim uporama i čeličnom užadi za privez. Ovo se stanje krcanja posebno tretira kod proračuna minimalnog nadvođa.

Ovim se brodovima često prevoze i komadni tereti. U prethodnom se razdoblju najčešće javljao zahtjev za mogućnošću prijevoza "containera" na otvorenoj palubi i u skladištima. U tim se slučajevima brodovi dodatno opremaju fiksnom i prijenosnom opremom za učvršćenje tereta. Ovo stanje krcanja nema presudan utjecaj na osnivanje broda, jer se javlja samo kao

mogućnost dodatnog tereta. Stoga treba obratiti pažnju i prilagoditi dimenzije teretnih grotala geometriji standardnih "containera", a ako je moguće maksimalizirati broj "containera" prilagodbom širine i visine broda, te aranžmanom glavne palube.

U posljednje se vrijeme često javlja zahtjev za mogućnošću prijevoza čeličnih poluproizvoda (najčešće "steel coils"). Ovakvi tereti također ne utječu bitno na projekt broda u fazi osnivanja, već je njihov utjecaj vezan za kasniju fazu - dimenzioniranje čelične strukture (pokrov dvodna) i proračun stanja krcanja (komadni tereti s velikim brojem mogućih varijacija položaja).

Brodovima za prijevoz rasutih tereta je svojstven minimalan volumen balastnih tankova. Prilikom plovidbe u lakom balastnom stanju bitno je ostvariti krmeni gaz koji omogućava minimalan uron brodskog vijka za rad bez kavitiranja, te pramčani gaz kojim će se u najvećem broju slučajeva izbjeći udaranje pramca o valove. Sigurna plovidba na teškom moru i dosizanje minimalnog gaza za prolazak Panamskim kanalom se postiže krcanjem (jednog ili više) teretnog skladišta balastom. Za tu je svrhu potrebno projektirati i konstruirati teretno skladište i grotleni poklopac za to stanje krcanja, te ga opremiti uređajima za ukrcaj/iskrcaj balasta.

Osnivanje brodova za prijevoz rasutih tereta je najčešće karakterizirano sljedećim osnovnim postavkama:

a) standardnom veličinom:
   - "lakeri" - brodovi sa mogućnošću plovidbe po Velikim jezerima;
   - "handy" i "handymax" brodovi - veličine 35000 - 40000 dwt, odnosno preko 50000 dwt, širine ograničene mogućnošću prolaska Panamskim kanalom, te maksimalnog gaza do 40 stopa (12.2 m);
   - "panamaxi" - brodovi s mogućnošću prolaska Panamskim kanalom i, u pravilu, ograničenjem duljine preko svega na 225 m;
   - "capesizeri" - najveći brodovi za prijevoz rasutih tereta nosivosti oko 170000 dwt;

b) velikom voluminoznošću teretnih skladišta;

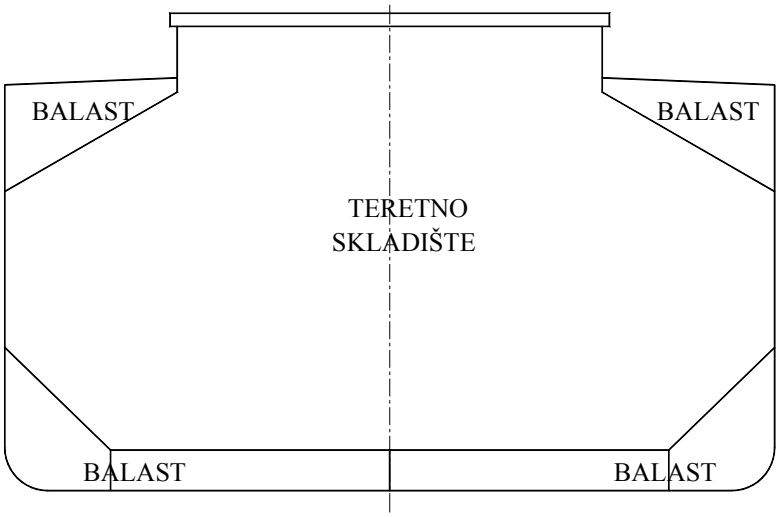
c) općom konfiguracijom sa 5 do 9 teretnih skladišta (ovisno o veličini broda);

d) sniženim nadvođem (B-60);

e) umjerenom brzinom (najčešće 14.5 do 15 uzlova u uvjetima pokusne plovidbe i na projektnom gazu);

f) upotrebom čelika povišene čvrstoće;

g) karakterističnim poprečnim presjekom prikazanim sljedećom slikom.



Slika br. 2. Tipični poprečni presjek broda za prijevoz rasutih tereta

Poprečni presjek je karakteriziran niskim dvodnom - visine minimalno zahtijevane pravilima klasifikacijskih društava ili diskretno višom (u slučaju da to traže tehnološki razlozi ili kao posljedica optimiranja strukture dvodna). Nagib kosine uzvojnih tankova se najčešće zadaje kutom veličine od oko 40^o, čime je omogućen kvalitetan iskrcaj tereta, te izvedba strukture na krajnjim presjecima u zadnjem teretnom skladištu (krmena rebra su u tom području brodske forme dosta "položena"). Kod pojedinih se projekata susreću i nešto manji kutovi, što olakšava izvedbu strukture na krmi, ali povećava raspon rebara.

Geometrija potpalubnih bočnih tankova je zadana širinom palubnog grotla i kutom kosine dna tanka. Taj se kut zadaje u iznosu od oko 30^o, čime je zadovoljen uvjet urednog ukrcaja najvećeg broja tereta (kut presipanja rasutih tereta).

Kod projektiranja suvremenih "bulkera" jako je izražen zahtjev za velikom širinom grotala tereta, prvenstveno zbog lakše manipulacije teretom. Širine grotala se kreću od iznosa diskretno manjeg od poluširine broda kod bočnog otvaranja grotlenih poklopaca ("side rolling") do 55-60 % širine broda kod uzdužnog slaganja poklopaca ("end folding"). Ova situacija ima za posljedicu složenije rješenje strukture palube.

4.2. Osnivanje brodova za prijevoz tekućih tereta

Brodove za prijevoz tekućih tereta ("tankere") možemo generalno podijeliti u sljedeće skupine:

- brodove za prijevoz specijalnih tekućih tereta (vodonosci, tankeri za prijevoz prirodnih sokova i ulja, brodovi za prijevoz uree, itd);
- brodove za prijevoz pothlađenih ili visoko zagrijanih tekućih tereta;
- brodove za prijevoz kemikalija;
- brodove za prijevoz sirove nafte i naftnih derivata.

Prva skupina brodova su visokospecijalizirani brodovi čija su osnovna svojstva i projekti strogo zadani karakteristikama tereta koje prevoze. U ukupnom broju svjetske tankerske flote predstavljaju vrlo malu skupinu. Zbog vlastitih specifičnosti mogu se tretirati i kao brodovi posebne namjene, pa se ova skupina neće detaljnije razmatrati u ovom radu.

Tankerima za prijevoz pothlađenih ili visoko zagrijanih tekućih tereta je zajedničko svojstvo da su teretni tankovi izloženi velikim toplinskim dilatacijama uslijed velike razlike u temperaturi tereta od temperature okoliša. U ovu skupinu pripadaju brodovi za prijevoz ukapljenog prirodnog plina (LNG tankeri), brodovi za prijevoz ukapljenih petrolejskih plinova (LPG tankeri) i brodovi za prijevoz visoko zagrijanih tekućih tereta (npr. asfalta).

Teretni tankovi mogu biti strukturni ili nestrukturni. U slučaju strukturnih tankova tereta brodska struktura je odvojena višeslojnom izolacijom od tereta, a kod rješenja sa nestrukturnim tankovima tereta, tankovi se vezuju za brodsku strukturu posebnim temeljima koji dopuštaju toplinske dilatacije teretnih tankova i izoliraju brodsku strukturu od njih. Ovo je vrlo značajna skupina tankera čije je projektiranje vrlo specifično. Ne karakteriziraju ih visoki blok koeficijenti i umjerene brzine, pa nadalje neće biti razmatrani.

Tankerima za prijevoz kemikalija je svojstven veliki broj teretnih tankova i segregacija tereta, viša dvodna i širi dvoboci, u pojedinim slučajevima upotreba nehrđajućeg čelika za tankove tereta. Ovi su brodovi, zbog visoke opasnosti od zagađenja i trovanja okoliša teretom, izuzetno jako i kvalitetno pokriveni pravilima i propisima za projektiranje i gradnju. Imaju dosta zajedničkih svojstava sa tankerima za prijevoz naftnih derivata, pa se projektni modeli takvih tankera mogu, uz određene preinake, primijeniti i na ovu skupinu brodova.

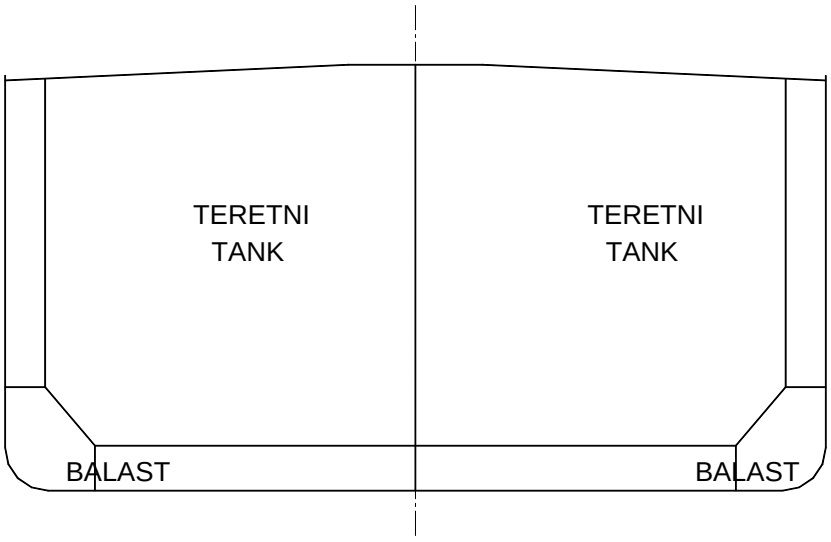
Četvrta i dominantna skupina su tankeri za prijevoz sirove nafte ("oil tankeri") i naftnih derivata ("product tankeri"). Svojstvena im je velika voluminoznost teretnih tankova. Kod tankera za prijevoz sirove nafte ona je nešto manja (specifična masa tereta na maksimalnom

gazu se kreće oko 0.9 t/m^3 ili nešto više). "Product" tankeri se projektiraju s većim relativnim volumenom teretnih tankova (uobičajena specifična masa tereta na maksimalnom gazu je oko 0.8 t/m^3).

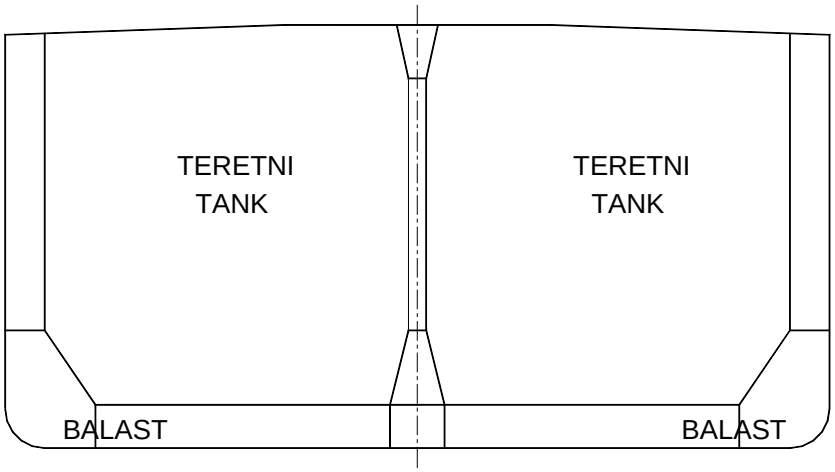
Tankeri za prijevoz sirove nafte zauzimaju projektni prostor većih brodova (od "panamax" veličina naviše), najčešće imaju tri segregacije tereta i teretne pumpe pogonjene parnim turbinama. Pregrade u teretnom prostoru su uobičajeno ravne s strukturom u teretnim tankovima.

Tankeri za prijevoz naftnih derivata su manjih dimenzija (najčešće do "panamax" ili "postpanamax" dimenzija), imaju veći broj segregacija, teretni sustav mogu biti pumpe pogonjene parnim turbinama ili uronjene pumpe (pogonjene bilo hidrauličkim i električnim motorima). Čest je slučaj primjene korugiranih pregrada u teretnom prostoru, a u pojedinim slučajevima se struktura palube izvodi s gornje strane. Time se postiže izuzetna čistoća tankova tereta, naravno uz dodatno otežavanje korektnog rješenja brodske strukture.

Uobičajena je konfiguracija broda s dvodnom, dvobokom i centralnom uzdužnom pregradom. Kod najvećih tankera ("VLCC") susrećemo projektno rješenje s dvije uzdužne pregrade. Minimalna visina dvodna i širina dvoboka su zadani međunarodnom regulativom. Njihovim zadovoljenjem se dobiva dovoljan volumen balastnih tankova za ispunjenje zahtjeva minimalnog MARPOL gaza u gotovo svim slučajevima. Samo kod najvećih tankera ("suezmax" i "VLCC" veličina) dimenzije dvodna i/ili dvoboka premašuju minimalno zahtijevane. Tipični poprečni presjeci "oil tankera" i "product tankera" su prikazani sljedećim slikama.



Slika br. 3. Tipični poprečni presjek tankera za prijevoz sirove nafte



Slika br. 4. Tipični poprečni presjek tankera za prijevoz naftnih derivata

Osnovni uvjeti koji karakteriziraju proceduru osnivanja tankera su sljedeći:

a) standardna veličina s dominantnim skupinama:

- "handy" mjera - tankeri veličine 45000 - 50000 dwt, duljine preko svega, u pravilu, do 600 stopa (182.88 m), širine ograničene mogućnošću prolaska Panamskim kanalom i maksimalnog gaza do 40 stopa (12.2 m);
- "panamax" veličina- tankeri s mogućnošću prolaska Panamskim kanalom i, u pravilu, ograničenjem duljine preko svega na 750 stopa (228.6 m);
- "aframax" skupina - tankeri od oko 110000 dwt na maksimalnom gazu te s projektnim gazom, u najvećem broju slučajeva, od 40 stopa (12.2 m);
- "suezmax" veličina - tankeri nosivosti 150000 - 170000 dwt, (ime nasljeđuju od ograničenja Sueskog kanala koja su vrijedila do sredine 2001. godine);
- "VLCC" skupina - vrlo veliki tankeri za prijevoz sirove nafte (nosivost oko 300000 dwt);

b) velika voluminoznost teretnih tankova;

c) opća konfiguracija s dvodnom, dvobokom, jednom ili dvije uzdužne pregrade, pet i više parova tankova tereta, parom taložnih tankova i pumpnom stanicom (tereta i balasta ili samo balasta);

d) brzina u najvećem broju slučajeva 15.5 do 16 uzlova u uvjetima pokusne plovidbe i na projektnom gazu;

e) upotreba čelika povišene čvrstoće.

5. MEĐUNARODNA REGULATIVA I ZAHTJEVI KLASIFIKACIJSKIH DRUŠTAVA

Brojna je regulativa koja pokriva područje projektiranja, gradnje i eksploatacije broda. U daljnjem će tekstu biti kratko obrađena samo najvažnija pravila i propisi koji dominantno utječu na osnivanje tankera i brodova za prijevoz rasutih tereta. Možemo ih podijeliti na sljedeće glavne skupine:

- pravila i propisi izdani od "International Maritime Organization" (IMO): prvenstveno "International Convention for the Safety of Life at Sea" (SOLAS), "International Convention for the Prevention of Pollution from Ships" (MARPOL) i "International Convention on Load Lines " (ICLL);
- pravila klasifikacijskih društava za gradnju brodova (harmonizirana pravila IACS-a za tankere i bulk-carriere);
- propisi za plovidbu kanalima.

5.1. Pravila i propisi izdani od "International Maritime Organization"

Konvencijom SOLAS [1] su pokrivena pravila za sigurno projektiranje, konstruiranje i operiranje brodova. Za fazu osnivanja broda najinteresantniji je dio konvencije kojim su definirana pravila za pregrađivanje i stabilitet: "Chapter II-1 Construction - Structure, subdivision and stability, machinery and electrical installations". To se u prvom redu odnosi na probabilistički proračun stabiliteta broda u oštećenom stanju ("Part B-1 - Subdivision and damage stability of cargo ships").

Kako je predmetni proračun vrlo složen, u ovom radu nije moguće detaljnije opisati sam postupak. U osnovi, vrši se veliki broj proračuna kvalitete preživljavanja broda prilikom raznih stanja naplavljivanja, s tim da se utjecaj svakog pojedinog stanja na ukupnu kvalitetu preživljavanja broda ponderira stupnjem vjerojatnosti da do takvog oštećenja broda dođe. Osnovni zahtjevi i definicije su sljedeće:

Zahtijevani indeks pregrađivanja (za brodove duljine preko 100 m)

$$R = (0.002 + 0.0009\, L_s)^{1/3} \qquad (5.1)$$

gdje je L_s definiran kao najveća projicirana teorijska duljina dijela broda na ili ispod palube, odnosno paluba koja ograničava naplavljivanje po visini kada brod plovi na najvišoj pregradnoj vodnoj liniji.

Postignuti indeks pregrađivanja

$$A = \Sigma\, p_i\, s_i \qquad (5.2)$$

gdje su

i - svaki pojedini odjeljak ili skupina odjeljaka čije se naplavljivanje razmatra u pojedinom slučaju,

p_i - vjerojatnost da će se naplaviti samo odjeljak ili skupina odjeljaka koji se razmatraju zanemarujući svako horizontalno pregrađivanje,

$s_i = C\,[0.5\,(GZ_{max})\,(\text{opseg stabiliteta})]^{½}$ - vjerojatnost prebrođenja nakon naplavljivanja odjeljka ili grupe odjeljaka koji se razmatraju uključujući učinak svakog horizontalnog pregrađivanja.

$C = 1$ kad je $\theta_e \le 25^o$
$C = 0$ kad je $\theta_e > 30^o$
$C = [(30 - \theta_e) / 5]^{½}$ kad je $25^o < \theta_e < 30^o$

GZ_{max} - maksimalna pozitivna poluga stabiliteta (m) unutar opsega stabiliteta, ali ne veća od 0.1 m.

θ_e - konačni ravnotežni kut nagiba oštećenog broda.

Opseg stabiliteta se uzima maksimalno do kuta nagiba od 20^o.

Postignuti indeks pregrađivanja mora biti veći od zahtijevanog. U protivnom slučaju treba se intervenirati u projekt, bilo dodatnim pregrađivanjem, povećavanjem nadvođa, premještanjem ili podizanjem otvora na palubi ili na neki drugi način.

Konvencija MARPOL [2] obuhvaća skup pravila kojima se regulira sprječavanje zagađenja okoliša uslijed djelovanja brodova. Dio zahtjeva i pravila kojima se zadani parametri o kojima treba voditi računa prilikom osnivanja tankera su grupirani u poglavljima koja se bave definiranjem geometrijske strukture i stabiliteta tankera: "Chapter II - Requirements for control of operational pollution" i "Chapter III - Requirements for minimizing oil pollution from oil tankers due to side and bottom damages". Ovom prilikom će biti istaknuta samo pravila koja su najutjecajnija u fazi osnivanja tankera.

Minimalne dimenzije dvoboka i dvodna su definirane u "Chapter II, Regulation 13F". Minimalna širina dvoboka (w) je definirana na sljedeći način:

w = 0.5 + DW / 20000 (m), ili (5.3)
w = 2.0 (m) , kojagod vrijednost da je manja. Minimalna vrijednost je 1.0 m.

gdje je DW (t) korisna nosivost.

Minimalna visina dvodna (h) se određuje kako slijedi:

h = B / 15 (m), ili (5.4)
h = 2.0 (m), kojagod vrijednost da je manja. Minimalna vrijednost je 1.0 m.

gdje je B (m) širina broda.

Maksimalne dimenzije tankova tereta su definirane u "Chapter III" i kratko opisane u narednom tekstu.

Maksimalna duljina pojedinog tanka tereta je 10 m ili jedna od narednih veličina, štogod da je veće.

a) za tankere bez uzdužne pregrade u teretnom prostoru

$(0.5\ b_i / B + 0.1)\ L$ ali ne više od 0.2 L (5.5)

b) za tankere s centralnom uzdužnom pregradom u teretnom prostoru

$(0.25\ b_i / B + 0.15)\ L$ (5.6)

c) za tankere s dvije ili više uzdužnih pregrada u teretnom prostoru

(i) za bočne tankove tereta: 0.2 L (5.7)

(ii) za centralne tankove tereta:

(1) ako je b_i / B jednak ili veći od jedne petine: 0.2 L (5.8)

(2) ako je b_i / B manji od jedne petine:

- kad nema centralne uzdužne pregrade: $(0.5\ b_i / B + 0.1)\ L$ (5.9)

- kad postoji centralna uzdužna pregrada: $(0.25\ b_i / B + 0.15)\ L$ (5.10)

gdje je b_i minimalna udaljenost predmetnog teretnog tanka do boka broda mjereno pod pravim kutom u odnosu na centralnu liniju na visini dodijeljenog ljetnog nadvođa.

Duljina broda L (m) je definirana kao 96% ukupne duljine broda na 85% teorijske visine broda, ili razmak od pramčane statve do centra osovine kormila na istoj vodnoj liniji, kojagod da je veća.

Maksimalni volumen tankova tereta je definiran na način da hipotetičko istjecanje tereta u slučaju oštećenja broda po boku O_c ili po dnu O_s ne smije biti veće od 30000 m^3 ili 400 $(DW)^{1/3}$, štogod da je veće, ali ne više od 40000 m^3.

Osnove izračuna hipotetičkog istjecanja tereta u slučajevima oštećenja broda su sljedeće:

(a) za bočna oštećenja

$$O_c = \Sigma W_i + \Sigma K_i C_i \quad (5.11)$$

(b) za oštećenja dna

$$O_s = 1/3\ (\Sigma Z_i W_i + \Sigma Z_i C_i) \quad (5.12)$$

gdje su

W_i = volumen bočnog teretnog tanka oštećenog u pojedinom slučaju

C_i = volumen centralnog teretnog tanka oštećenog u pojedinom slučaju

$K_i = 1 - b_i / t_c$ kad je b_i veći ili jednak t_c zadana vrijednost K_i je 0

$Z_i = 1 - h_i / v_s$ kad je h_i veći ili jednak v_s zadana vrijednost Z_i je 0

b_i = širina predmetnog bočnog teretnog tanka (m) mjerena pod pravim kutom u odnosu na centralnu liniju na visini dodijeljenog ljetnog nadvođa;

h_i = minimalna visina dvodna (m);
t_c, v_s su oštećenja broda definirana u daljnjem tekstu.

Pretpostavljena oštećenja broda za proračun hipotetskog istjecanja tereta su definirana kako slijedi:

(a) Oštećenje boka

(i) Prostiranje po duljini (l_c): ⅓ $L^{2/3}$ ili 14.5 m, štogod je manje; (5.13)

(ii) Prostiranje po širini (t_c): B/5 ili 11.5 m, štogod je manje; (5.14)

(iii) Prostiranje po visini (v_c): od dna broda prema gore bez ograničenja.

(b) Oštećenje dna

	Područje 0.3 L od pramčanog perpendikulara	Bilo koje drugo područje	
(i) Prostiranje po duljini (l_s):	L/10	L/10 ili 5 m, štogod je manje	(5.15)
(ii) Prostiranje po širini (t_s):	B/6 ili 10 m, štogod je manje, ali ne manje od 5 m	5 m	(5.16)
(iii) Prostiranje po visini od dna broda (v_s):	B/15 ili 6 m, štogod je manje		(5.17)

Uvjeti i kriteriji proračuna stabiliteta u "Chapter III" i "Chapter II, Regulation 13F". Kratak pregled relevantnih pravila je nadalje izložen.

Kriterije za stabilitet u oštećenom stanju moraju zadovoljiti:

- tankeri duljine od 225 m ili veće za oštećenje bilo gdje po dužini broda,
- tankeri duljine od 150 m do 225 m za oštećenje bilo gdje po dužini broda, osim oštećenja pregrada strojarnice (koja se tretira kao jedina oštećena u zasebnom slučaju oštećenja),
- tankeri duljine do 150 m oštećenje bilo gdje po dužini broda između susjednih poprečnih pregrada i izuzimajući strojarnicu.

Slučajevi oštećenja:

(a) Oštećenje boka

(i) Prostiranje po duljini: ⅓ $L^{⅔}$ ili 14.5 m, štogod je manje; (5.18)

(ii) Prostiranje po širini: (od boka broda prema unutra pod pravim kutovima na centralnu liniju na visini ljetne vodne linije) B/5 ili 11.5 m, štogod je manje; (5.19)

(iii) Prostiranje po visini: od teorijske ravnine dna broda u centralnoj ravnini prema gore bez ograničenja.

(b) Oštećenje dna

	Područje 0.3 L od pramčanog perpendikulara	Bilo koje drugo područje	
(i) Prostiranje po duljini:	⅓ $L^{⅔}$ ili 14.5 m, štogod je manje	⅓ $L^{⅔}$ ili 5 m, štogod je manje	(5.20)
(ii) Prostiranje po širini:	B/6 ili 10 m, štogod je manje	B/6 ili 5 m, štogod je manje	(5.21)
(iii) Prostiranje po visini od dna broda:	B/15 ili 6 m, štogod je manje, mjereno od teorijske ravnine dna broda u centralnoj ravnini		(5.22)

(c) Oštećenje oplate dna (za tankere od minimalno 20000 dwt)

(1) Prostiranje po duljini:

(i) za brodove od 75000 dwt i veće: 0.6 L mjereno od pramčanog perpendikulara; (5.23)

(ii) za brodove manje od 75000 dwt: 0.4 L mjereno od pramčanog perpendikulara; (5.24)

(2) Prostiranje po širini: B/3 bilo gdje po dnu; (5.25)

(3) Prostiranje po visini: do visine dvodna. (5.26)

Kriteriji stabiliteta u oštećenom stanju su sljedeći:

(a) Ravnotežna vodna linija nakon naplavljivanja mora biti ispod bilo kojeg otvora preko kojeg je moguće progresivno naplavljivanje;

(b) Konačni ravnotežni kut kod slučajeva nesimetričnog naplavljivanja ne smije prelaziti 25^o. U slučaju da linija glavne palube nije potopljena, kut može biti do 30^o.

(c) U ravnotežnom stanju nakon naplavljivanja opseg stabiliteta mora biti najmanje 20^o, maksimalna pozitivna poluga stabiliteta 0.1 (m) u opsegu do 20^o, a površina ispod krivulje unutar navedenog opsega mora biti najmanje 0.0175 (m rad).

Zahtjev za minimalnim volumenom balastnih tankova na brodu je zadan u "Chapter II, Regulation 13" na način da su definirani minimalni balastni gazovi. Minimalni balastni gaz na sredini broda d_m je zadan kao:

$$d_m = 2.0 + 0.02\ L\ (m) \quad (5.27)$$

s maksimalnim krmenim trimom od 0.015 L. Krmeni gaz mora također biti toliki da omogući potpuni uron brodskog vijka.

Konvencijom ICLL (1966) s pripadajućim amandmanima [3] je definiran proračun minimalnog nadvođa za sve tipove brodova osim ratnih brodova, jahti, brodova duljine manje od 24 m, postojećih brodova manjih od 150 GT i ribarica.

Kako su proračunom uzeti u obzir utjecaji svih utjecajnih faktora (blok koeficijent, visina na boku, nadgrađe i palubni kovčezi, preluk, skok, dimenzije kaštela i krmice, itd), ovom prilikom nije moguće detaljnije opisati sam proračun. Pažnju ćemo obratiti samo na definiciju tipova brodova obzirom na dodijeljeno nadvođe ("Chapter III, Regulation 27"). Brodovi se generalno dijele na dva tipa:

- tip "A" - brodovi koji su konstruirani za prijevoz nepakiranih tekućih tereta (tankeri), čiji teretni tankovi imaju samo male palubne otvore zatvorene vodonepropusnim poklopcima;
- tip "B" - svi ostali brodovi.

Zbog svojih konstruktivnih svojstava tankeri kvalitetnije preživljavaju naplavljivanje nego ostali brodovi. To je razlog zbog kojeg je minimalno zahtijevano nadvođe niže za tip "A" od onoga za tip "B". Brodovima tipa "B" može biti dodijeljeno i niže nadvođe od proračunatog - tzv. sniženo "B" nadvođe (najčešće do 60% razlike "B" i "A" nadvođa ako su ispunjeni uvjeti preživljavanja broda prilikom stanja naplavljivanja definiranih u konvenciji).

5.2. Pravila klasifikacijskih društava za gradnju brodova

Diljem je svijeta u pomorskim i brodograđevnim zemljama organizirano djelovanje velikog broja klasifikacijskih društava. Osnovni su im zadaci postavljanje zahtjeva za gradnju brodova, nadzor brodova tijekom gradnje i eksploatacije, te unapređivanje razine kvalitete i sigurnosti brodova razvojem tehničkog, tehnološkog i znanstvenog znanja primjenjivog u brodogradnji i pomorstvu.

Najveća klasifikacijska društva su organizirana unutar "International Association of Classification Societies" (IACS). Svrha ovakvog udruživanja je u izmjeni iskustava i podataka, kvalitetnijem razvoju pravila za gradnju brodova i usuglašavanju i unificiranju pravila pojedinih društava. Unutar IACS-a se razvijaju nova, jedinstvena pravila za gradnju pojedinih tipova brodova, primjerice jedinstvena pravila za gradnju brodova za rasute terete.

U istu su se svrhu organizirala najveća klasifikacijska društva u svijetu (Lloyd's Register of Shipping, American Bureau of Shipping i Det Norske Veritas na izradi novih, jedinstvenih pravila za gradnju tankera te Bureau Veritas i drugi za gradnju bulk carriera). Nova pravila stupila su na snagu sredinom 2006. godine.

U fazi osnivanja broda izbor klasifikacijskog društva nije od presudnog utjecaja na projektni model. Iskustveno se može doći do zaključka o utjecaju pojedinog klasifikacijskog društva na vlastitu masu određenog tipa i veličine broda, no taj je utjecaj nižeg reda veličine i gotovo zanemariv. Zbog toga, pravila klasifikacijskih društava utječu na osnivanje broda samo kroz zahtjeve na opću konfiguraciju broda. Pažnju treba obratiti na sljedeće zahtjeve (prikazani su zahtjevi DNV-a, ostala klasifikacijska društva imaju slične formulacije):

1) Minimalni broj nepropusnih poprečnih pregrada

   Za brodove bez uzdužne pregrade i sa strojarnicom na krmi broj pregrada je definiran sljedećom tablicom:

Duljina broda (m)	Broj pregrada
$85 < L \leq 105$	4
$105 < L \leq 125$	5
$125 < L \leq 145$	6
$145 < L \leq 165$	7
$165 < L \leq 190$	8
$190 < L \leq 225$	9
$L > 225$	razmatra se posebno

Tablica br. 1. Broj poprečnih pregrada

L (m) - duljina između perpendikulara (ne treba uzeti manju od 96%, ni veću od 97% duljine vodne linije na maksimalnom gazu)

Broj nepropusnih poprečnih pregrada može biti reduciran u odnosu na minimalno zahtijevani. U tom slučaju brod mora udovoljiti uvjetima stabiliteta u oštećenom stanju, te se posebno razmatra sa stajališta opće konfiguracije i čvrstoće broda.

2) Položaj sudarne pregrade

Položaj sudarne pregrade definira duljinu pramčanog pika, odnosno duljinu teretnog prostora. Definiran je kako slijedi:

Udaljenost od pramčanog perpendikulara (x_c) se mora kretati unutar nadalje navedenih vrijednosti:

$$x_{c\,(minimum)} = 0.05\,L - x_r\,(m) \qquad \text{za } L < 200 \text{ m} \qquad (5.28)$$
$$x_{c\,(minimum)} = 10 - x_r\,(m) \qquad \text{za } L \geq 200 \text{ m}$$

$$x_{c\,(maksimum)} = 0.08\,L - x_r\,(m)$$

gdje su:

L - duljina broda definirana prema ICLL, odnosno, 96% ukupne duljine broda na 85% teorijske visine broda, ili razmak od pramčane statve do centra osovine kormila na istoj vodnoj liniji, kojagod da je veća.

x_r - redukcija zbog pramčanog bulba, definirana kao

$x_r = 0$ za pramac bez bulba

odnosno, kao najmanja veličina od sljedećih za pramac s pramčanim bulbom:

$x_r = 0.5\ x_b$ (m)
$x_r = 0.015$ L (m)
$x_r = 3.0$ (m)

gdje je

x_b - duljina pramčanog bulba.

3) Minimalna visina dvodna

Minimalna visina dvodna definirana je preko zahtjeva za visinom centralnog nosača i rebrenica dvodna u centralnoj liniji broda. Minimalna visina (h_{min}) je definirana na sljedeći način:

$$h_{min} = 250 + 20\ B + 50\ d_s \text{ (mm), minimalno 650 mm} \quad (5.29)$$

gdje su

B - širina broda (m)
d_s - maksimalni gaz (m)

5.3. Propisi za plovidbu kanalima

Postoji vrlo veliki broj kanala i morskih ili riječnih prolaza kojima je moguće ploviti samo brodovima ograničenih dimenzija. U ovoj će točki biti kratko opisana ograničenja samo triju najznačajnijih kanala kojima plove brodovi obuhvaćeni ovim radom: Kanala Sv. Lovrijenca, Panamskog kanala i Sueskog kanala.

5.3.1. Kanal Sv. Lovrijenca

Pravila za plovidbu su publicirana u [4]. Prilikom osnivanja broda treba voditi računa o sljedećim pravilima i ograničenjima:

- maksimalna duljina broda preko svega - 222.5 m;
- maksimalna širina preko svega - 23.8 m;
- maksimalni gaz - 7.92 m;
- maksimalni zračni gaz - 35.5 m.

5.3.2. Panamski kanal

Pravila za plovidbu su definirana u [5]. Ograničenja i zahtjevi koje trebaju ispuniti tankeri i brodovi za prijevoz rasutog tereta su sljedeći:

- maksimalna duljina broda preko svega - 289.6 m;
- maksimalna širina preko svega - 32.31 m;
- maksimalni gaz - 12.04 m, uz uvjet minimalnog radijusa uzvoja od 1.79 m (u tropskoj slatkoj vodi specifične mase 0.9954 kg/m^3);
- maksimalni zračni gaz - 57.91 m;
- minimalni gazovi u morskoj vodi definirani su na sljedeći način:

za duljinu broda veću od	pramčani gaz	krmeni gaz
129.54 m	2,44 m	4.30 m
144.80 m	5.50 m	6.10 m
160.02 m	6.10 m	6.71 m
176.80 m	6.71 m	7.32 m
190.50 m	7.32 m	7.93 m

Uvjet za minimalnim gazovima za prolazak Kanalom je značajan zbog toga što je stroži nego prethodno opisani MARPOL-ov zahtjev, te stoga kod tankera postaje dominantan kod određivanja minimalnog volumena balastnih tankova. Brodovi za prijevoz rasutih tereta rješavaju problem krcanjem balasta u namijenjeno skladište tereta.

5.3.3. Sueski kanal

Pravila za plovidbu Sueskim kanalom su objavljena u [6]. Brodovi širine do 49.98 m (164') smiju prolaziti kanalom na gazu do 18.89 m (62'). Brodovima širine veće od 49.98 m maksimalni je gaz u prolazu definiran tablicom kojom su zadani odnosi širine i gaza broda. Sljedećom tablicom su prikazan izvaci iz pravila.

Širina (m)	Gaz (m)	Širina (m)	Gaz (m)	Širina (m)	Gaz (m)
49.98	18.89	56.33	16.76	64.46	14.65
50.80	18.59	57.37	16.46	65.83	14.32
51.66	18.28	58.47	16.15	67.38	14.02
52.52	17.98	59.58	15.85	68.88	13.72
53.44	17.68	60.75	15.54	70.43	13.41
54.38	17.37	61.97	15.24	75.59	12.50
54.34	17.07	63.24	14.93	77.49	12.19

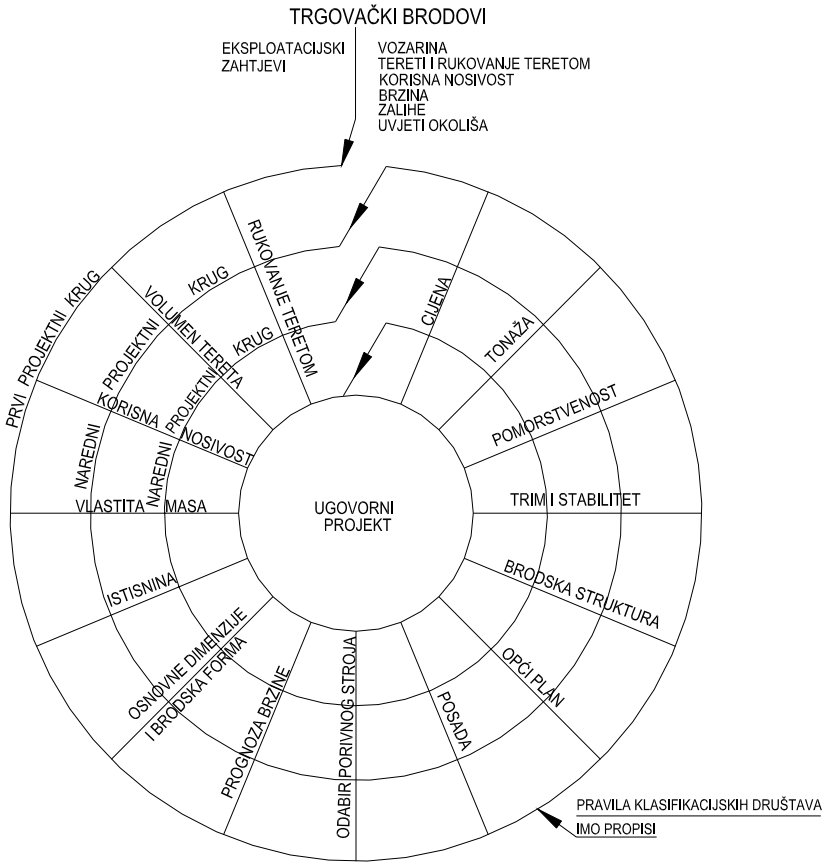
Tablica br. 2. Ograničenja izmjera broda za prolaz Sueskim kanalom (izvaci)

Umnožak širina iz gornje tablice s pripadajućim gazovima daje konstantnu veličinu od oko 944.5 m^2, što pokazuje da je limitirajuća veličina kod prolaska kanalom površina poprečnog presjeka broda.

Iz gornje se tablice može izvući zaključak da sve veličine brodova, osim VLCC-a, mogu nesmetano prolaziti Sueskim kanalom. Današnja generacija VLCC tankera ima, u pravilu, korisnu nosivost od oko 300000 tona, širinu od oko 60 metara, a maksimalni gaz je u području od 20-22 metra. Gaz kojim je brodovima te veličine dopušten prolaz je oko 15.7-15.8 metara, što znači da kanalom mogu ploviti s nešto više od 200000 dwt.

6. PROJEKTNE PROCEDURE U OSNIVANJU TRGOVAČKIH BRODOVA PUNE FORME

Osnivanje broda se tijekom dugog niza godina baziralo na tzv. "projektnoj spirali". Postupak je detaljno opisivan u stručnoj literaturi od samih početaka znanstveno-stručnog pristupa ovoj problematici. Osnova postupka se sastoji u tome da se u jednom projektnom krugu, po unaprijed zadanom redoslijedu, izvrše svi proračuni nužni za definiranje projekta broda, te da rezultati posluže kao baza za ponavljanje proračuna u narednom projektnom krugu. Time se dobije tzv "projektna spirala" u kojoj je rezultat svakog idućeg projektnog kruga sve bliži optimalnom rješenju. Donjom slikom je prikazana projektna spirala preuzeta iz [25].



Slika br. 5. Projektna spirala osnivanja trgovačkih brodova

Izložena procedura metodološki odgovara postupcima osnivanja broda ručnim alatima ili alatima iz početka razvoja kompjutorske tehnologije. Tijekom rada projektant je koncentriran na točno provođenje proračuna i donošenje odluke u kojem će smjeru idući krug projektne spirale usmjeriti, odnosno, da li će postignuto rješenje smatrati konačnim. Ovom metodom nije moguće postići kvalitetno procjenjivanje utjecaja pojedinih varijabli i parametara na konačno rješenje, kao ni optimirati projekt obzirom na više mogućih ciljeva.

U ovom poglavlju je nadalje izložena projektna procedura koja omogućava kvalitetno korištenje dosegnute razine razvoja računarske tehnike i primjenjivih suvremenih optimizacijskih metoda.

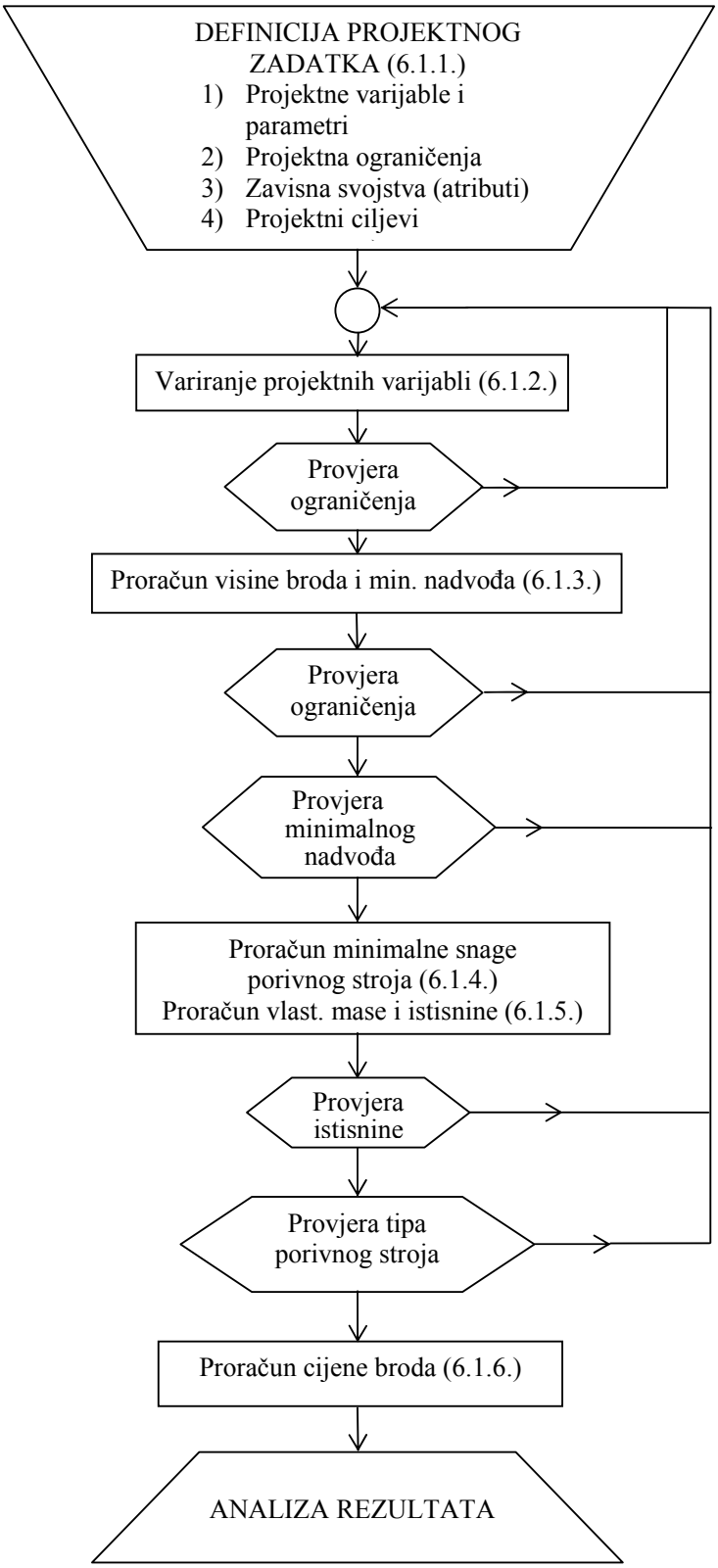
Osnovna projektna procedura za osnivanje tankera i brodova za prijevoz rasutih tereta je jedinstvena [7,8,13,15]. Razlog tome leži u srodnosti osnovnih karakteristika ovih dvaju tipova brodova (prethodno opisanih u Poglavlju 3). Mogu se generalno podijeliti na dvije osnovne skupine: opću projektnu proceduru i na posebne (specijalne, strogo usmjerene) projektne procedure.

6.1. Opća projektna procedura

Opća procedura se može podijeliti na sljedeće osnovne korake:

1. Definiranje ulaznih veličina: projektnih varijabli i parametara, projektnih ograničenja, zavisnih projektnih veličina (atributa) i projektnih ciljeva;
2. Variranje projektnih varijabli i
   provjera ograničenja;
3. Proračun visine broda i
   provjera minimalnog nadvođa;
4. Proračun minimalne snage porivnog stroja;
5. Proračun vlastite mase i istisnine i
   provjera istisnine i tipa porivnog stroja;
6. Proračun cijene materijala, rada i broda ukupno;
7. Analiza dobivenih rezultata.

Prikazana je blok shemom na Slici br. 6.



Slika br. 6. Blok shema opće projektne procedure

6.1.1. Definicija projektnog zadatka

Da bismo u potpunosti definirali projektni zadatak i ciljeve projektnog postupka moramo definirati sljedeće skupine podataka:

6.1.1.1. Projektne varijable i parametri

a) osnovne izmjere:

- duljina među okomicama L_{pp} (m),
- širina B (m),
- maksimalni gaz d_s (m),
- koeficijent punoće C_B (-);

b) identifikator porivnog stroja I_{ME} (-);

c) projektni zahtjevi koje ispunjavamo unutar nekih granica:

- korisna nosivost DW (t),
- volumen teretnog prostora V_{car} (m^3),
- tražena brzina v_{tr} (čv).

d) "specifična voluminoznost broda" κ, definirana kao:

$$\kappa = V_{car} / (L_{pp}\ B\ D)\ (-) \tag{6.1}$$

gdje je D visina na boku (m).

e) procijenjeni utjecaj upotrebe čelika povišene čvrstoće na smanjenje mase čelične konstrukcije,

f) podaci potrebni za izbor porivnog stroja (maksimalne snage pojedinih strojeva MCR_i),

g) podaci potrebni za izračun cijene materijala (cijene mogućih porivnih strojeva C_{MEi}, prosječnu jediničnu cijenu čelika c_{st} i cijenu preostalog materijala i opreme C_{fix}),

h) podaci potrebni za izračun cijene rada (proizvodnost brodogradilišta P_{cGT}, jedinična satnica V_L i preostali troškovi C_{pt}).

6.1.1.2. Projektna ograničenja

Projektna ograničenja su definirana na dva načina:

a) minimalnim i maksimalnim vrijednostima osnovnih projektnih varijabli:

- ograničenja duljine broda: $L_{pp\ min}$, $L_{pp\ max}$,
- ograničenja širine broda: B_{min}, B_{max},
- ograničenja maksimalnog gaza broda: $d_{s\ min}$, $d_{s\ max}$,
- ograničenja koeficijenta punoće broda: $C_{B\ min}$, $C_{B\ max}$.

b) graničnim vrijednostima međusobnih odnosa osnovnih izmjera broda (obuhvaćaju iskustvene ili projektne granice koje nisu nužno obuhvaćene prethodnim minimalnim, odnosno maksimalnim ograničenjima osnovnih projektnih varijabli):

- ograničenja odnosa duljine i širine broda: $(L_{pp}/B)_{min}$, $(L_{pp}/B)_{max}$,
- ograničenja odnosa duljine i maksimalnog gaza broda: $(L_{pp}/d_s)_{min}$, $(L_{pp}/d_s)_{max}$,
- ograničenja odnosa širine i maksimalnog gaza broda: $(B/d_s)_{min}$, $(B/d_s)_{max}$,
- ograničenja odnosa duljine i visine broda: $(L_{pp}/D)_{min}$, $(L_{pp}/D)_{max}$.

6.1.1.3. Zavisna projektna svojstva (atributi)

Zavisna projektna svojstva (atributi) ovise o vrijednosti pojedinih projektnih varijabli i parametara, te su sljedeća:

a) masa čelične konstrukcije W_{st} (t),
b) cijena materijala (USD),
c) cijena rada (procesa) (USD),
d) cijena broda (USD),
e) postignuta korisna nosivost DW (t),
f) postignuti volumen teretnog prostora V_{car} (m^3),
g) postignuta brzina v_{tr} (čv).

6.1.1.4. Projektni ciljevi

Projektni ciljevi ovise prvenstveno o tipu broda i specifičnostima njegove namjene. Kao mogući projektni ciljevi mogu se primjerice navesti sljedeći:

a) minimizirati masu čelične konstrukcije,
b) minimizirati snagu porivnog stroja,
c) minimizirati cijenu materijala broda,
d) minimizirati cijenu rada (procesa),
e) minimizirati cijenu izgradnje broda,
f) minimizirati vlastitu masu broda,
g) maksimizirati stabilitet,
h) maksimizirati brzinu (uz zadanu snagu porivnog stroja), itd.

Kvaliteta projektnog rješenja se procjenjuje kvalitetom ispunjenja pojedinih projektnih ciljeva ili projektnih varijabli (atributa) - višeciljnom ili višeatributnom sintezom projekta.

Pripadnim preferencijama određujemo važnost pojedinog cilja ili atributa u višedimenzijskom području projektnih rješenja. Mogu se aplicirati razne metode za njihovu definiciju: primjerice metoda pridruživanja pojedinih utjecajnih faktora - pondera u kojoj svakom cilju (koji mogu varirati ovisno o kvaliteti cilja od minimalno 0 do maksimalno 1) [7,8,13,15], ili primjerice metode primijenjene u ovom radu - višeatributne sinteze projekta u kojoj se svakom projektnom svojstvu pridružuje vlastita neizrazita funkcija, dok se odnosi međusobnih važnosti pojedinih projektnih svojstava zadaju Saaty-evom metodom [18,19,20,21,22,23,24].

6.1.2. Variranje projektnih varijabli i provjera ograničenja

Osnovne izmjere broda L_{pp}, B, d_s, C_B se variraju unutar projektnog područja u zadanim koracima: L_{korak}, B_{korak}, $d_{s\ korak}$, $C_{B\ korak}$. Svaka kombinacija projektnih varijabli treba biti provjerena u odnosu na projektna ograničenja i odbačena ukoliko ih ne zadovoljava.

6.1.3. Proračun visine broda i minimalnog nadvođa

Visina broda D se dobije jednostavnim proračunom iz ulaznih podataka (traženi volumen teretnog prostora V_{car} i specifična voluminoznost broda κ) i aktualne kombinacije projektnih varijabli L_{pp}, B.

6.1.4. Proračun minimalne snage porivnog stroja

Približan proračun minimalne snage porivnog stroja je moguće provesti na različite načine, empirijskim formulama [14,25,26], točnijim aproksimativnim izrazima za pojedino područje osnovnih izmjera i brzine broda [7,8,13,15], ili nekom drugom metodom.

6.1.5. Proračun vlastite mase i istisnine

Vlastita masa broda se dijeli u tri glavne skupine: masu čelične konstrukcije W_{st}, masu strojo opreme W_m i masu ostale opreme W_o. Za proračun pojedinih masa postoji širok izbor iskustvenih podataka i formula dostupnih u literaturi, npr. [7,8,13,15,25,26].

Potrebna istisnina se računa kao zbroj vlastite mase i korisne nosivosti. Postignuta istisnina se računa kao umnožak osnovnih izmjera broda L_{pp}, B, d_s, C_B sa specifičnom masom morske vode s uključenim utjecajem oplate broda i privjesaka i mora odgovarati potrebnoj u okvirima zadovoljenja projektnog atributa korisne nosivosti (DW).

6.1.6. Proračun cijene broda

Ukupnu cijenu broda C_{NB} čine cijena materijala C_M, cijena rada (procesa) C_L i preostali troškovi C_{pt}.

Izračun cijene materijala potrebnog za izgradnju broda u fazi osnivanja broda pojednostavnjeno se izvodi zbrajanjem dominantnih elemenata čiji zbroj čini ukupnu cijenu materijala: cijene porivnog stroja C_{ME}, cijene čelika C_{st} i cijene preostalog materijala i opreme C_{fix}.

Cijena porivnog stroja je zadana kao fiksna veličina ili kao niz fiksnih veličina ukoliko je moguć izbor porivnog stroja između više tipova, odnosno veličina stroja.

Cijena čelika direktno ovisi o glavnim izmjerama broda i njihovim odnosima i računa se približnim iskustvenim formulama.

Cijenu preostalog materijala čini sva preostala brodska oprema - oprema za pretovar tereta i balasta, kormilarenje, sidrenje i privez, smještaj posade, navigaciju, pomoćni strojevi i uređaji, automatizacija, oprema za spašavanje itd. Kako nabrojena oprema ne ovisi, ili samo

diskretno ovisi o glavnim izmjerama broda, u ovoj se fazi projektiranja može smatrati fiksnom veličinom.

Cijena rada (procesa) uobičajeno se računa prema OECD-ovoj metodologiji kojom se razni tipovi i veličine brodova svode na "standardni" brod (detaljno opisano u poglavlju 7.6.2.). Cijena procesa po jedinici proizvoda (umnožak jedinične satnice V_L i proizvodnosti brodogradilišta P_{cGT}) se množi sa "količinom proizvoda" (umnoškom veličine broda mjerene u bruto tonama GT i odgovarajućeg faktora kompenzacije f_c).

Preostali troškovi (troškovi klasifikacijskog društva, financiranja, dokovanja, angažmana vanjskih institucija, itd) se u fazi osnivanja mogu smatrati fiksnim.

6.2. Posebne projektne procedure

Posebne projektne procedure se razvijaju u specijalnim, jako definiranim projektima. U pravilu se razviju pojednostavljenjem opće procedure i služe samo u pojedinim specifičnim slučajevima [9,10,11,12].

Generalno se može ustanoviti da se posebne procedure primjenjuju kod projektiranja u vrlo ograničenom projektnom području i s većim brojem fiksnih osnovnih izmjera. Obzirom da nije moguće uopćiti ovakve slučajeve, pojašnjenje posebnih projektnih procedura će biti izloženo kroz sljedeći primjer.

U osnivanju standardnog broda za prijevoz rasutih tereta panamax veličine [9] fiksirane su slijedeće osnovne izmjere i projektni zadaci:

L_{oa} = 225 m
B = 32.24 m
d_d = 12.2 m
v_{tr} = 15.1 čv
$d_s \leq$ 14.1 m

Osnovni projektni zahtjevi su postavljeni tako da se premaše maksimalno dosegnute veličine cijelog niza suvremenih brodova izgrađenih u dalekoistočnim brodogradilištima:

$V_{car} \geq 91000\ m^3$
DW ≥ 76000 t

Jedina projektna varijabla koja nije čvrsto ograničena je koeficijent punoće C_B. Stoga je u navedenom primjeru postizanje fokusiranog cilja (što veće korisne nosivosti broda) moguće jedino maksimaliziranjem vrijednosti koeficijenta punoće.

Zbog toga je u projektnoj proceduri osnovna pažnja posvećena kvaliteti brodske forme i propulzije. Rezultat takvog pristupa ovom projektnom zadatku je brod sljedećih osnovnih karakteristika:

L_{oa} = 225.00 m
L_{pp} = 217.00 m
B = 32.24 m
d_d = 12.20 m
DW_d = 64000 t

d_s = 14.10 m
DW_s = 77000 t
V_{car} = 92000 m^3
Snaga porivnog stroja 9580 kW pri 110 okr/min.
Brzina na pokusnoj plovidbi, projektnom gazu, te sa 8620 kW - 15.1 čv.

Postignute karakteristike broda su premašile projektni zahtjev za korisnom nosivošću za 1000 t, a za volumenom skladišta tereta za 1000 m^3. Time su dosegnute bitno veće vrijednosti od konkurentskih projekata, a projekt je atraktivniji kod plasmana na tržište.

7. MATEMATIČKI MODELI OSNIVANJA TRGOVAČKIH BRODOVA PUNE FORME

Matematičko definiranje prethodno opisane opće projektne procedure je obrađeno u [7,8,13,15]. Matematički model slijedi postupke iz procedure, te za konkretne slučajeve definira pojedine vrijednosti koje su nužne da bismo, slijedeći proceduru, došli do završnih rezultata.

Slijedeći logiku opće projektne procedure matematički model možemo prikazati na sljedeći način.

7.1. Definicija projektnog zadatka

7.1.1. Projektne varijable i parametri

Projektne varijable i parametri su sljedeći:

a) Osnovne izmjere:

- duljina među okomicama L_{pp} (m),
- širina B (m),
- maksimalni gaz d_s (m),
- blok koeficijent C_B (-);

b) Identifikator porivnog stroja I_{ME},

c) Projektni zahtjevi koje ispunjavamo unutar zadanih granica (opisani detaljno u poglavlju 8.):

- korisna nosivost DW (t),
- volumen teretnog prostora V_{car} (m^3),
- tražena brzina v_{tr} (čv) (u pravilu se definira za uvjete pokusne plovidbe na projektnom gazu).

d) Specifična voluminoznost broda $\kappa = V_{car} / (L_{pp}\ B\ D)$ (-) ovisi prvenstveno o tipu i veličini broda. Daje omjer "neto iskorištenog volumena broda", odnosno volumena teretnog prostora i "maksimalnog volumena" zadanog umnoškom triju osnovnih izmjera broda. Kod brodova s manjom strojarnicom, balastnim tankovima i ostalim potpalubnim

prostorima specifična je voluminoznost veća (zbog toga bulk carrier-i imaju, u pravilu, veću specifičnu voluminoznost od tankera). Veličina broda također utječe na iznos ovog parametra (veći brod ima redovito i veću specifičnu voluminoznost). Na njegov iznos utječe i vrijednost blok koeficijenta.

e) Faktor utjecaja upotrebe čelika povišene čvrstoće na smanjenje mase čelične konstrukcije se zadaje kao postotak procijenjenog smanjenja u odnosu na brodsku konstrukciju izgrađenu u cijelosti od običnog brodograđevnog čelika. Maksimalni iznos uštede mase (kod vrlo velikog opsega upotrebe čelika povišene čvrstoće) je do 15%.

f) Maksimalne snage pojedinih porivnih strojeva MCR_i koji mogu doći u obzir za ugradnju u brod. Pri selektiranju strojeva treba obavezno obratiti pažnju ne samo na maksimalne snage koje ostvaruju, nego i na pripadne nominalne okretaje i opću konfiguraciju stroja.

g) Podaci potrebni za izračun cijene materijala se sastoje od:

- cijene mogućih porivnih strojeva C_{MEi},
- prosječne jedinične cijene čelika c_{st},
- cijene preostalog materijala i opreme C_{fix}.

h) Podaci potrebni za izračun cijene rada:

- proizvodnost brodogradilišta P_{cGT},
- jedinična satnica V_L,
- preostali troškovi C_{pt}).

7.1.2. Projektna ograničenja

Projektna ograničenja mogu biti definirana minimalnim i maksimalnim vrijednostima osnovnih projektnih varijabli ili graničnim vrijednostima međusobnih odnosa osnovnih projektnih varijabli.

a) Minimalne i maksimalne vrijednosti osnovnih projektnih varijabli (izmjera broda) su sljedeće:

- ograničenja duljine broda: $L_{pp\ min}$, $L_{pp\ max}$;
- ograničenja širine broda: B_{min}, B_{max};
- ograničenja maksimalnog gaza broda: $d_{s\ min}$, $d_{s\ max}$;
- ograničenja koeficijenta punoće broda: $C_{B\ min}$, $C_{B\ max}$.

Gornje granične vrijednosti osnovnih izmjera su najčešće limitirane ograničenjima tehnoloških mogućnosti gradnje broda u pojedinom brodogradilištu, pravilima i propisima koja proistječu iz međunarodne regulative ili ograničenjima nametnutim od strane brodovlasnika.

Minimalne vrijednosti osnovnih izmjera se, u pravilu, zadaju iskustveno kao granice područja ispod kojih nije realno očekivati projektno rješenje.

Ograničenja koeficijenta punoće su također, u pravilu, iskustveni podaci. Minimalna vrijednost blok koeficijenta se zadaje kao empirijski podatak ispod kojeg se ne očekuje projektno rješenje, te nema veću važnost kod definiranja projektnih granica. Osnovni problem je odrediti maksimalnu vrijednost koeficijenta punoće na razini koja neće hendikepirati kvalitetu optimalnog projektnog rješenja, a također će omogućiti kvalitetnu izvedbu brodske forme.

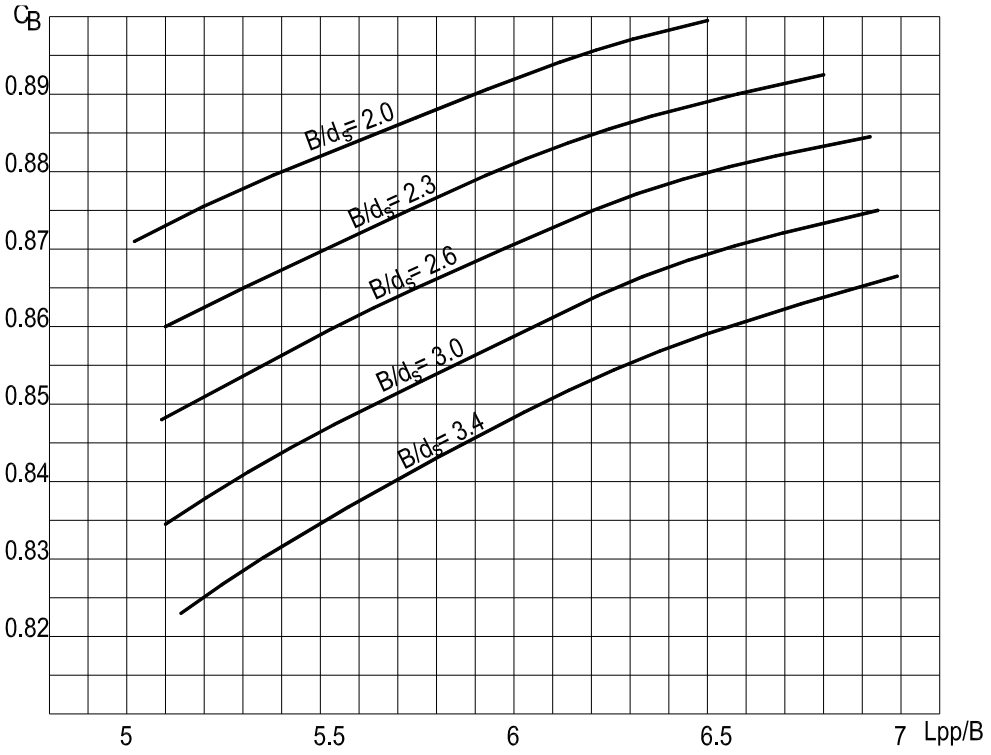
Definiranje maksimalne vrijednosti blok koeficijenta je složen zadatak koji zavisi od više parametara: odnosa duljine i širine, odnosa širine i gaza, oblika pramčanih rebara i veličine pramčanog bulba, radijusa uzvoja, oblika krmenih rebara. U fazi osnivanja broda se ne može voditi računa o svim spomenutim odnosima, pa se stoga treba usredotočiti na dva dominantna: odnose L_{pp}/B i B/d_s.

Omjer duljine i širine broda utječe na maksimalnu vrijednost koeficijenta punoće na način da je s većim iznosima navedenog omjera moguće postići veće vrijednosti koeficijenta punoće. To je jednostavno objašnjivo ako se promatra na primjeru povećanja duljine paralelnog srednjaka na postojećoj brodskoj formi: i L_{pp}/B i C_B se povećavaju.

Omjer širine i gaza broda utječe na koeficijent punoće potpuno obrnuto od prethodno opisanog odnosa, odnosno, što je B/d_s veći, doseziva vrijednost blok koeficijenta je to manja. Ovo je također jednostavno objašnjivo činjenicom da dubljim uranjanjem broda raste C_B (zbog porasta koeficijenta punoće vodne linije), a zbog porasta gaza odnos B/d_s pada.

Preporuke za maksimalne vrijednosti koeficijenta punoće su prikazane slijedećom slikom i zasnovane su na autorovom iskustvu i posljednjoj generaciji brodskih formi razvijenih u

Brodosplitu [9,10,11,12]. Također je važno napomenuti da, ukoliko nije nužno potrebno, treba izbjegavati projektna rješenja na samoj gornjoj granici koeficijenta punoće.



Slika br. 7. Preporučene maksimalne vrijednosti koeficijenta punoće

b) Granične vrijednosti međusobnih odnosa osnovnih projektnih varijabli obuhvaćaju sljedeće iskustvene ili projektne granice:

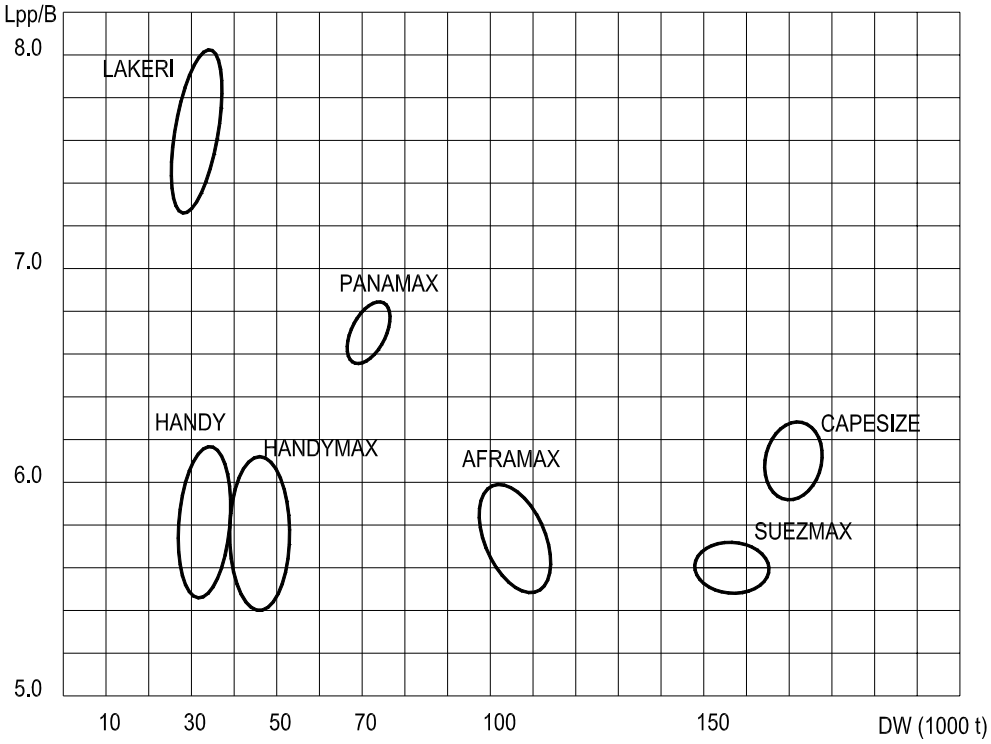
- ograničenja odnosa duljine i širine broda: $(L_{pp}/B)_{min}$, $(L_{pp}/B)_{max}$;
- ograničenja odnosa duljine i maksimalnog gaza broda: $(L_{pp}/d_s)_{min}$, $(L_{pp}/d_s)_{max}$;
- ograničenja odnosa širine i maksimalnog gaza broda: $(B/d_s)_{min}$, $(B/d_s)_{max}$;
- ograničenja odnosa duljine i visine broda: $(L_{pp}/D)_{min}$, $(L_{pp}/D)_{max}$.

Projektna ograničenja su bazirana na projektantskom iskustvu. Preporučene vrijednosti ograničenja variraju ovisno o veličini i tipu broda. Generalno bi se trebale kretati u sljedećim okvirima:

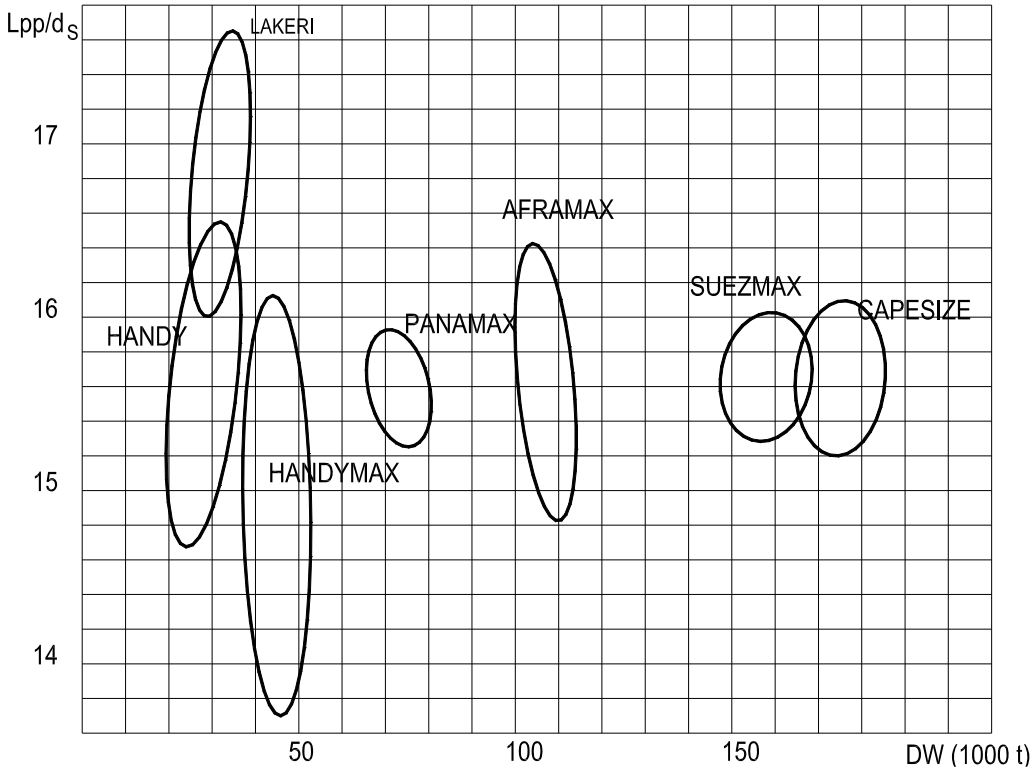
(7.1)

$$5.0 \leq (L_{pp}/B) \leq 8.0$$
$$14.0 \leq (L_{pp}/d_s) \leq 18.0$$
$$2.2 \leq (B/d_s) \leq 3.3$$
$$9.5 \leq (L_{pp}/D) \leq 13.0$$

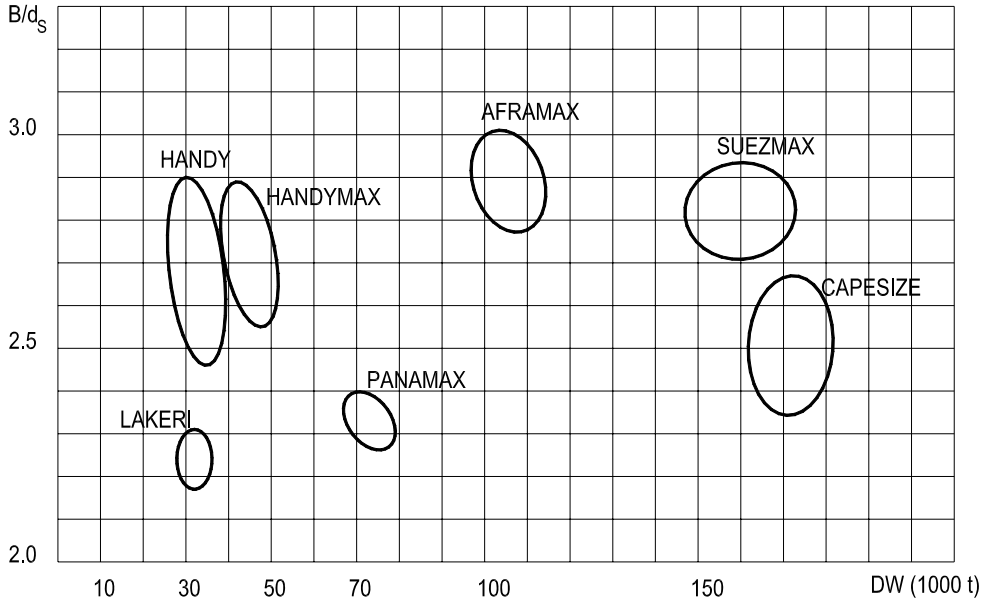
Na narednim slikama su prikazane preporuke za definiranje projektnih ograničenja. Preporuke su zasnovane na šezdesetak projekata izrađenih tijekom posljednjih godina u Brodosplitu i treba ih koristiti samo kao orijentaciju.



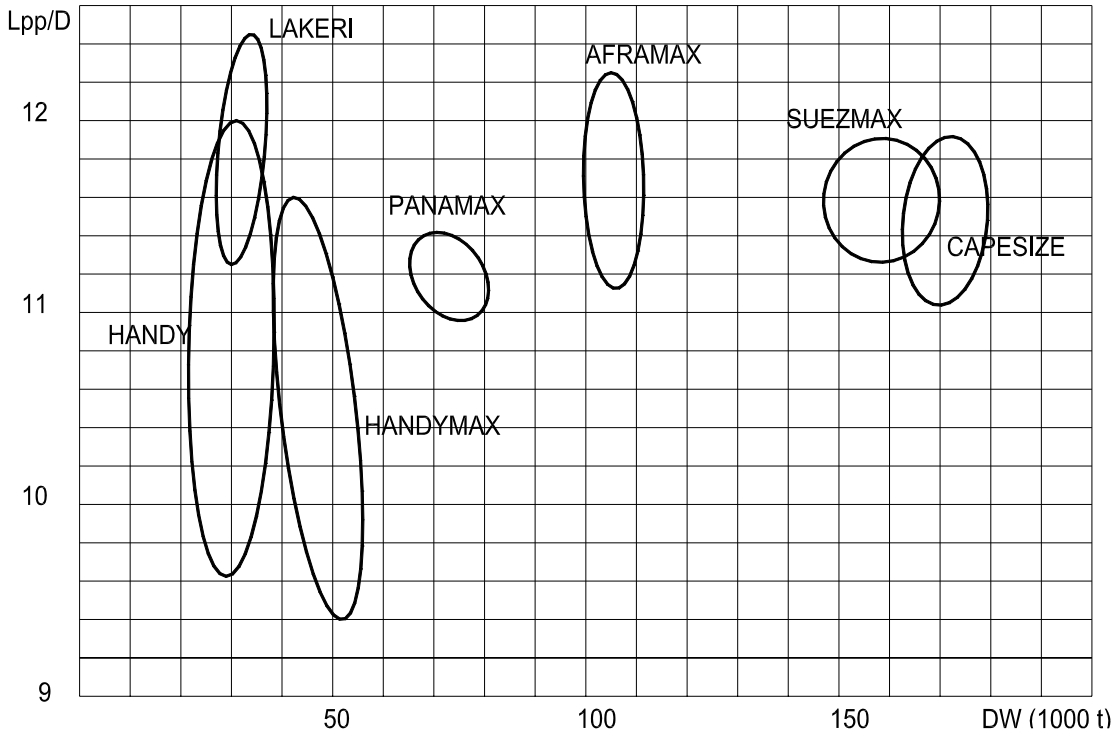
Slika br. 8. Preporučena ograničenja L_{pp}/B



Slika br. 9. Preporučena ograničenja L_{pp}/d_s



Slika br. 10. Preporučena ograničenja B/d_s



Slika br. 11. Preporučena ograničenja L_{pp}/D

7.1.3. Zavisna projektna svojstva (atributi)

Zavisna projektna svojstva (atributi) su ona čiji iznos ovisi o ulaznim veličinama (projektnim varijablama i parametrima), te su nadalje opisana.

a) Masa čelične konstrukcije W_{st} (t) ovisi o osnovnim izmjerama broda i tipu i veličini broda. Na masu čelične konstrukcije također utječu specifičnosti pojedinog projekta (veličina nadgrađa, klasa leda, kaštel, krmica itd).

b) Cijena materijala (USD) ovisi o ukupnoj cijeni čelika, cijeni odabranog tipa porivnog stroja i cijeni preostalog materijala.

c) Cijena rada (procesa) (USD) se računa tako da proizlazi iz ukupnog volumena broda, složenosti broda, jedinične satnice i proizvodnosti brodogradilišta.

d) Cijena broda (USD) je zbroj cijene materijala, cijene rada i iznosa preostalih troškova.

e) Korisna nosivost DW (t) ovisi o glavnim izmjerama i vlastitoj masi broda.

f) Volumen teretnog prostora V_{car} (m^3) ovisi o glavnim izmjerama i zadanoj "specifičnoj voluminoznosti broda.

g) Brzina v_{tr} (čv) ovisi o glavnim izmjerama broda i broju okretaja propelera.

7.1.4. Projektni ciljevi

Kod osnivanja tankera i bulk carrier-a možemo definirati sljedeće projektne ciljeve:

a) Minimiziranje snage porivnog stroja

Porivni stroj je najskuplji dio brodske opreme i u ukupnoj cijeni koštanja broda može sudjelovati čak do 15%. Zbog toga je minimiziranje snage stroja izuzetno zanimljivo. U tom smislu treba uvažavati i činjenicu da maksimalna snaga (i cijena) mogućih porivnih strojeva raste skokovito, u odnosu na tip i broj cilindara odabranog stroja. Stoga se ovaj projektni cilj javlja kao vrlo utjecajan, odnosno ciljani porivni stroj treba pokušati iskoristiti do njegove maksimalne snage.

b) Minimiziranje mase čelične konstrukcije broda

Projektni cilj minimalne mase čelične konstrukcije broda je naročito interesantan zbog težnje ka minimiziranju mase upotrebljenog čelika (vrlo sličan je kriterij minimalne vlastite mase broda jer je čelična konstrukcija u ukupnoj masi dominantna). Ovisno o tipu i veličini broda, udio čelika može doseći do 30% ukupne cijene koštanja.

c) Minimiziranje cijene materijala ugrađenog u brod

Kod minimalne cijene materijala koji je potreban za izgradnju broda dvije su dominantne veličine - cijena porivnog stroja i čelika. Cijene preostalog materijala i brodske opreme su rascjepkane na vrlo veliki broj manjih stavki koje nije moguće u fazi osnivanja korelirati s osnovnim karakteristikama broda, pa se njihov iznos može smatrati konstantnim.

d) Minimiziranje ukupne cijene rada (procesa)

U pojedinim je slučajevima interesantno minimizirati cijenu rada (procesa). To se odnosi prvenstveno na one situacije kad se na tržištu javlja manjak kvalificirane radne snage, pa stoga treba uzeti u obzir i mogućnost optimiranja projekta prema ovom projektnom cilju.

e) Minimiziranje cijene izgradnje broda

Ovo je za brodogradilište dominantan projektni cilj. Minimiziranje cijene novogradnje je, uz zadovoljenje svih projektnih zahtjeva, od presudnog značaja za graditelja broda. Time se postižu najpovoljniji komercijalni rezultati za ugovoreni projekt i cijenu broda.

7.2. Variranje projektnih varijabli i provjera ograničenja

Osnovne izmjere (duljina među okomicama L_{pp}, širina B, maksimalni gaz d_s i blok koeficijent C_B) variramo između njihovih minimalnih i maksimalnih vrijednosti u odgovarajućim koracima:

- korak duljine broda $L_{pp\ korak}$,
- korak širine broda B_{korak},
- korak maksimalnog gaza broda $d_{s\ korak}$,
- korak koeficijenta punoće broda $C_{B\ korak}$.

Pri određivanju iznosa pripadnih koraka treba obratiti pažnju da njihova veličina bude tehnološki izvediva u brodogradilištu, odnosno da ne budu premaleni.

7.3. Proračun visine broda i minimalnog nadvođa

Proračun visine broda D za svaku kombinaciju projektnih varijabli L_{pp}, B i V_{car}, te zadanog projektnog parametra κ je sljedeći:

$$D = V_{car} / (L_{pp}\ B\ \kappa)\ (m) \qquad (7.2)$$

Proračun minimalnog nadvođa se izvodi pojednostavljenim računom minimalnog nadvođa baziranom na aktualnoj kombinaciji projektnih varijabli (L_{pp}, B, d_s, C_B), te unaprijed zadanim vrijednostima ostalih utjecajnih faktora (kaštel, preluk, palubni skok, itd.).

U ovoj fazi nije moguće napraviti apsolutno točan proračun, ali to nije ni potrebno. Kod daljnje razrade projekta je uvijek moguće raznim utjecajnim faktorima umjereno korigirati proračun.

Nakon provjere visine broda u odnosu na minimalno traženo nadvođe, proračun s aktualnom kombinacijom projektnih varijabli se nastavlja ili se kombinacija odbacuje.

7.4. Proračun minimalne snage porivnog stroja

Vrlo precizna metoda za aproksimaciju trajne snage u službi CSR je korištena u [7,8,13,15]. Nadalje će biti kratko izložena.

Na osnovi baze podataka za kočenu snagu porivnog stroja i brzinu broda u području projektnih ograničenja osnovnih izmjera broda (duljine L_{pp}, širine B, gaza d_s i koeficijenta punoće C_B) vrši se aproksimacija snage funkcijom zadanog oblika [16]. Izvor baze podataka mogu biti rezultati modelskih serijskih ispitivanja, rezultati velikog broja rezultata pokusnih plovidbi ili rezultati nekog od dostupnih programa za proračun otpora i brzine broda.

U [7,8,13,15] je korišten SEAKING-ov program baziran na ITTC-ovim preporukama i SSPA-ovim korekcijskim faktorima. Za odabrano područje osnovnih projektnih varijabli L_{pp}, B, d_s, C_B, te za područje brzina oko tražene i pretpostavljeni broj okretaja propelera, izračuna se tražena snaga porivnog stroja. Regresijskom analizom [16] se određuju slobodni parametri u funkciji aproksimacije ($a_1 - a_n$) te se minimalizira srednje odstupanje od rezultata iz baze podataka. Mogući su razni opći oblici funkcije aproksimacije.

U ovom radu će biti korišten oblik upotrebljen u [7,8,13,15], gdje je CSR definiran sljedećom aproksimacijom:

$$CSR = a_1 L_{pp}^{a2} B^{a3} d_s^{a4} C_B^{a5} v_{tr}^{a6} (1 + a_7 L_{pp}/d_s) \qquad (kW) \qquad (7.3)$$

U slučaju kad postoji samo jedan mogući izbor tipa porivnog stroja, provodi se provjera izračunate snage u odnosu na najveću snagu koju odabrani stroj može davati kao trajnu u službi, te se projektno rješenje prihvaća kao zadovoljavajuće, ili se odbacuje.

Ukoliko imamo mogućnost izbora između dvaju ili više porivnih strojeva, mora se provesti korekcija izračunate snage za pretpostavljene okretaje svakog pojedinog alternativnog stroja, a izbor porivnog stroja se vrši od stroja manje snage ka stroju (strojevima) veće snage.

7.5. Proračun vlastite mase i istisnine

Vlastita masa broda LS je definirana kao zbroj mase čelične konstrukcije W_{st}, mase strojo opreme W_m i mase ostale opreme W_o, odnosno:

$$LS = W_{st} + W_m + W_o \ (t) \qquad (7.4)$$

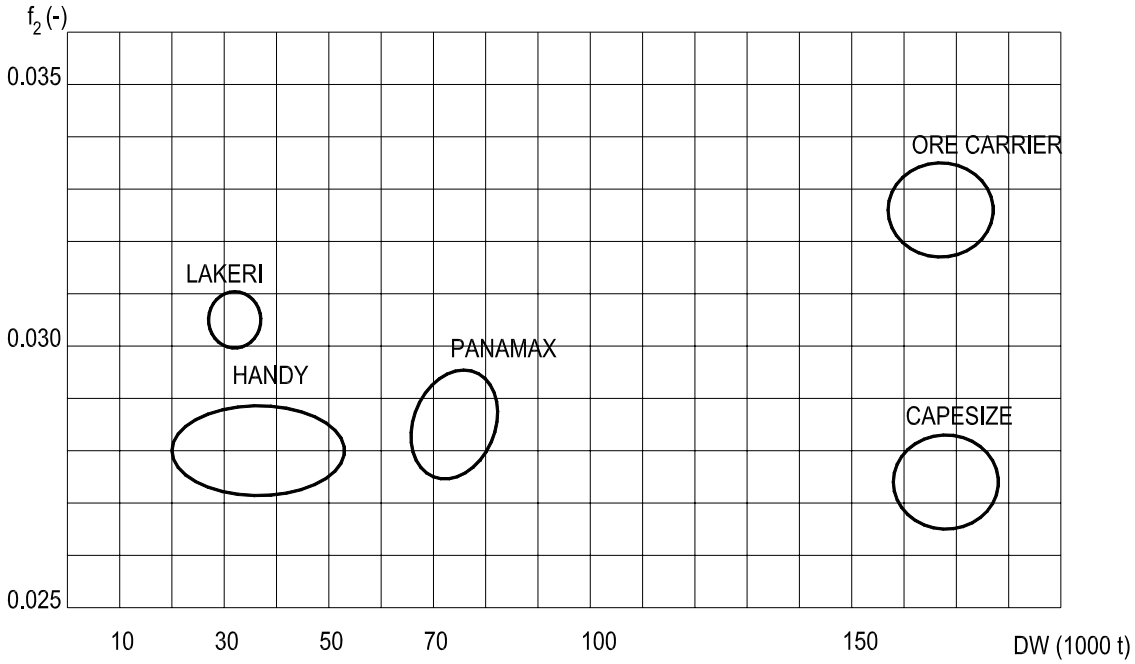
Za proračun pojedinih masa postoji širok izbor iskustvenih podataka i formula dostupnih u literaturi, npr. [7,8,13,14,15]. Ovom prilikom će biti izloženi sljedeći opći oblici iskustvenih formula:

a) Masa čelične konstrukcije

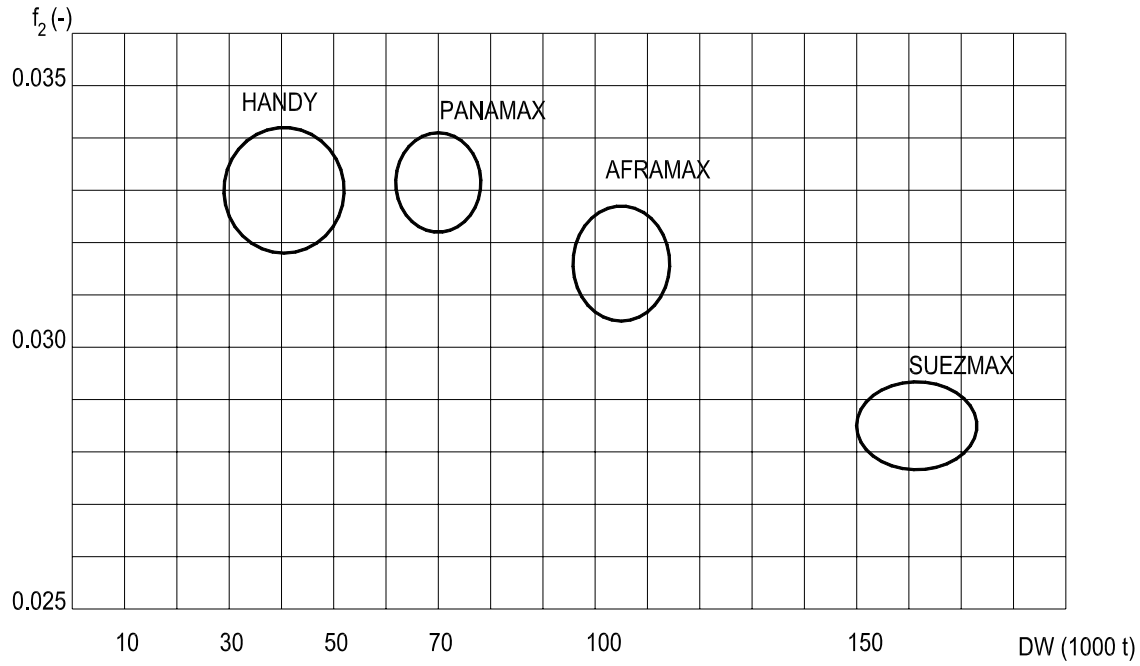
$$W_{st} = (1 - f_1/100)\,(f_2\,[L_{pp}\,(B + 0.85\,D + 0.15\,d_s)]^{1.36}\,\{1 + 0.5\,[(C_B - 0.7) + (1 - C_B)\,(0.8\,D - d_s)/3\,d_s]\} + f_3)\,(t) \qquad (7.5)$$

gdje su:

f_1 - faktor utjecaja upotrebe čelika povišene čvrstoće na smanjenje mase čelične konstrukcije (%)
f_2 - iskustveni faktor prikazan na slikama 12 i 13 (-)
f_3 - dodatak za masu nadgrađa i specifičnosti pojedinog projekta (kaštel, klasa leda i sl.) (t)



Slika br. 12. Faktor f_2 (brodovi za prijevoz rasutih tereta)



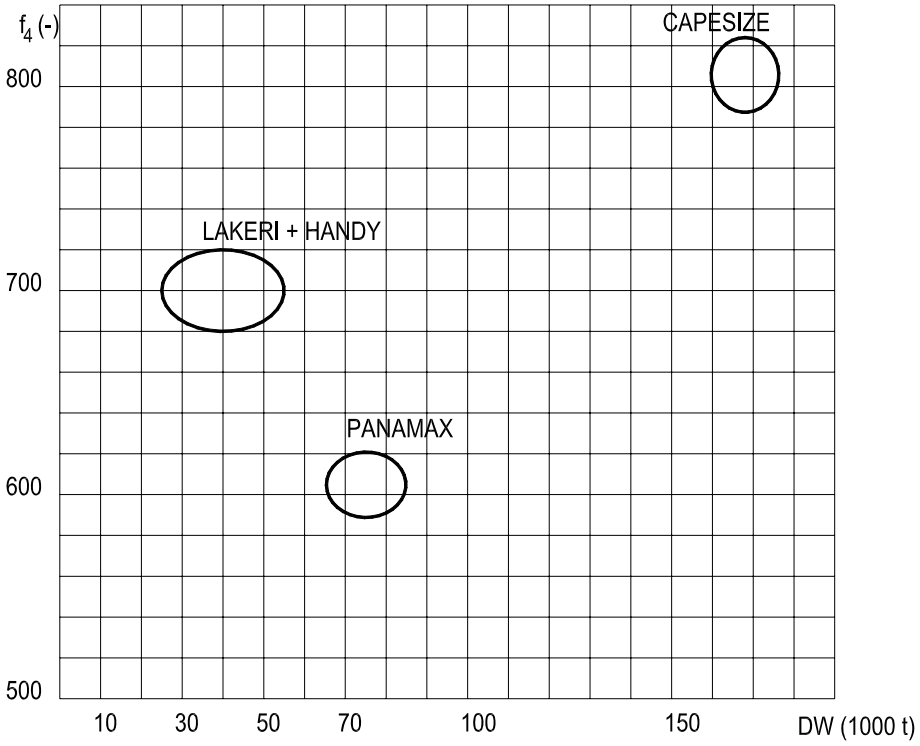
Slika br. 13. Faktor f_2 (tankeri)

b) Masa strojo opreme

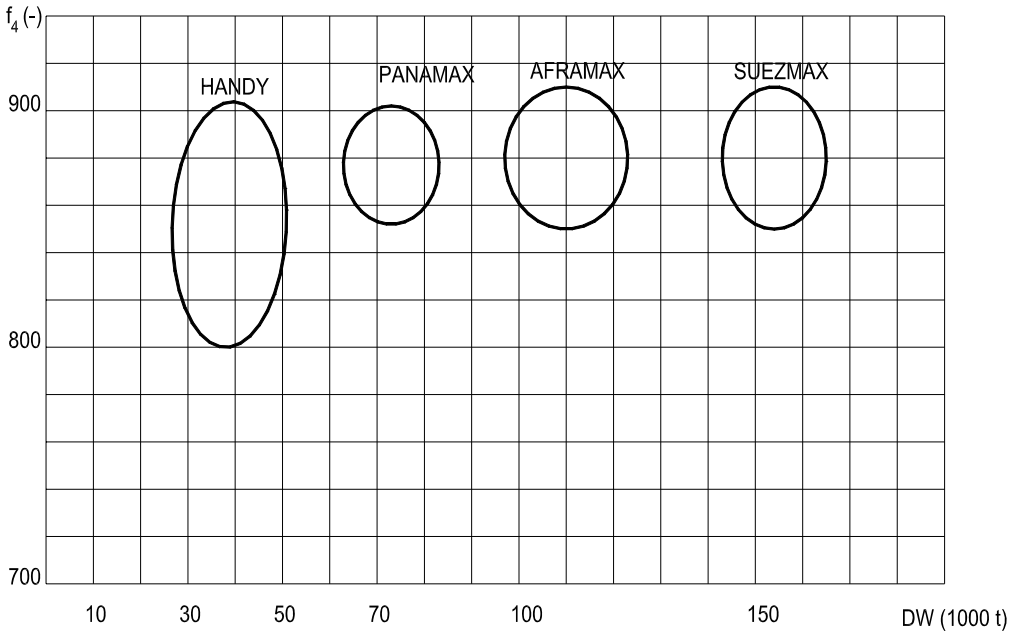
$$W_m = SMCR\ (f_4 - 0.0034\ SMCR) / 7350\ (t) \qquad (7.6)$$

gdje su:

SMCR = CSR / f_5 - maksimalna selektirana snaga porivnog stroja (kW)
CSR - trajna snaga u službi (kW)
f_4 - iskustveni faktor prikazan na slikama 14 i 15 (-)
f_5 - odnos CSR-a i SMCR-a, kreće se od 0.85 do 0.9, ovisno o točki optimiranja porivnog stroja



Slika br. 14. Faktor f_4 (brodovi za prijevoz rasutih tereta)



Slika br. 15. Faktor f_4 (tankeri)

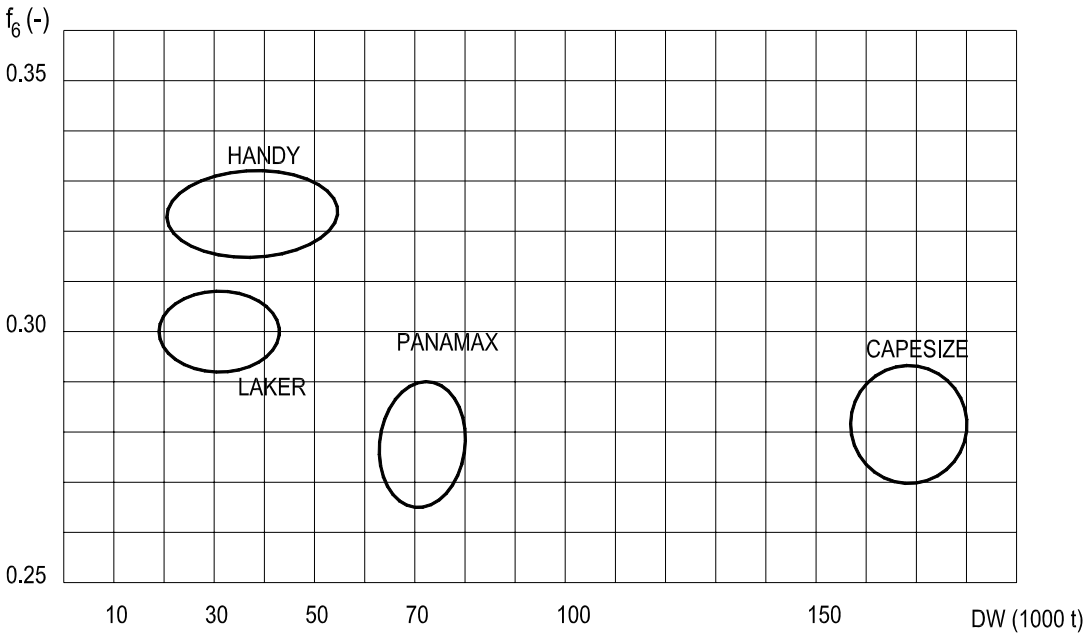
c) Masa opreme

$$W_o = (f_6 - L_{pp} / 1620) L_{pp} B + f_7 \text{ (t)} \quad (7.7)$$

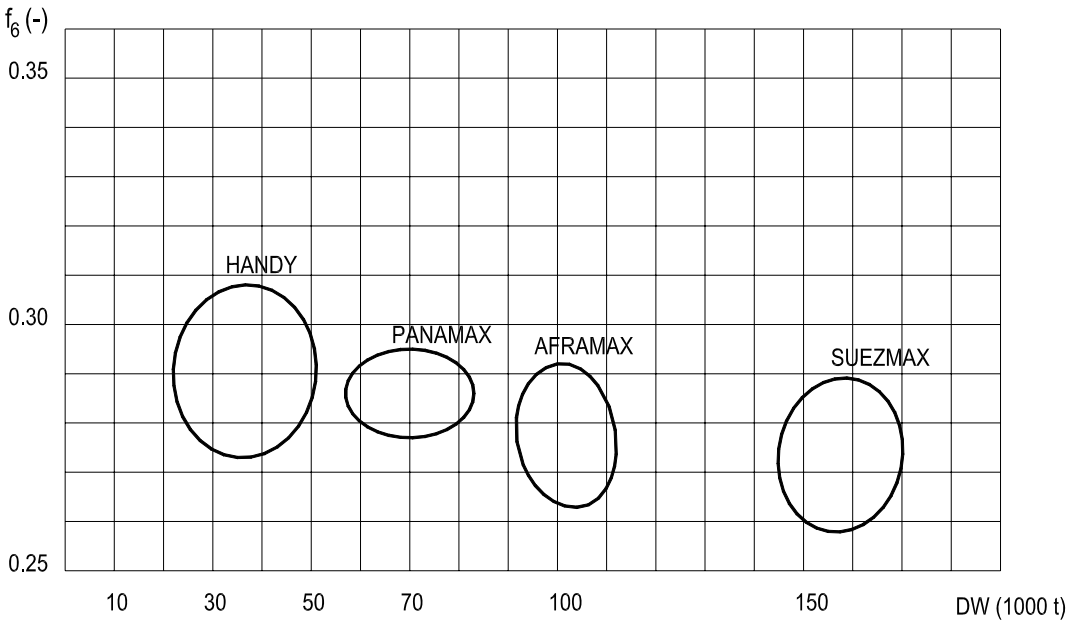
gdje su:

f_6 - iskustveni faktor prikazan na slikama 16 i 17 (-)

f_7 - dodatak za masu brodske opreme koja je specifična za pojedini projekt (palubne dizalice, helikopterska platforma i sl.) (t)



Slika br. 16. Faktor f_6 (brodovi za prijevoz rasutih tereta)



Slika br. 17. Faktor f_6 (tankeri)

7.6. Proračun cijene broda

Cijena novogradnje C_{NB} se sastoji od cijene materijala C_M, cijene rada (procesa) C_L i preostalih troškova C_{pt}, odnosno:

$$C_{NB} = C_M + C_L + C_{pt} \text{ (USD)} \tag{7.8}$$

7.6.1. Proračun cijene materijala

Cijenu materijala C_M možemo definirati na sljedeći način:

$$C_M = C_{ME} + C_{st} + C_{fix} \text{ (USD)} \tag{7.9}$$

gdje su

C_{ME} - cijena porivnog stroja (USD)

$$C_{st} = W_{gst}\, c_{st} \text{ (USD)} \tag{7.10}$$

W_{gst} - bruto masa čelika (nabavna količina koja je uvećana za 10-15% u odnosu na masu čelične konstrukcije W_{st} zbog otpada kod obrade materijala) (t)

c_{st} - prosječna jedinična cijena čelika (USD/t)

C_{fix} - cijena preostalog materijala i opreme (USD)

7.6.2. Proračun cijene rada (procesa)

Cijena procesa C_L računa kako slijedi:

$$C_L = f_c\, GT\, P_{cGT}\, V_L \text{ (USD)} \tag{7.11}$$

gdje su:

f_c - faktor kompenzacije prema OECD-u, definiran sljedećom tablicom:

dwt	tankeri za prijevoz sirove nafte	tankeri za prijevoz naftnih derivata i kemikalija	brodovi za prijevoz rasutih tereta
- 4000	1.85	2.30	1.60
4000 - 10000	1.30	1.60	1.10
10000 - 30000	0.85	1.05	0.70
20000 - 30000	0.85	1.05	0.70
30000 - 40000	0.70	0.80	0.60
40000 - 50000	0.70	0.80	0.60
50000 - 60000	0.55	0.60	0.50
60000 - 80000	0.55	0.60	0.50
80000 - 160000	0.45	0.55	0.40
160000 - 250000	0.35		0.30
250000 -	0.35		

Tablica br. 3. Faktori kompenzacije prema OECD-u (izvadak)

GT - bruto tonaža broda, definirana kako slijedi [17]:

$$GT = K_1 V \tag{7.12}$$

gdje su

V - ukupni zatvoreni volumen broda (m^3)

$$K_1 = 0.2 + 0.02 \log V \tag{7.13}$$

P_{cGT} - proizvodnost (radni sati/f_cGT)

V_L - jedinična satnica (USD/radni sat)

7.6.3. Preostali troškovi

Preostali troškovi (troškovi financiranja, dokovanja, angažmana tegljača, modelskih ispitivanja, vanjskih usluga, itd.) se mogu smatrati fiksnim u ovoj fazi osnivanja broda i zadaju se kao projektni parametar.

8. METODE OPTIMIRANJA U OSNIVANJU TRGOVAČKIH BRODOVA PUNE FORME

U poglavlju 6. "Projektne procedure u osnivanju trgovačkih brodova pune forme" je u točki 6.1. opisana opća projektna procedura. Procedura se koristi u svim slučajevima - od provjere pojedinog projekta (jedne konkretne točke u projektnom prostoru), preko optimizacije jednostavnim optimizacijskim metodama (primjerice metodom enumeracije i pretragom kompletnog područja ostvarivih projekata), do suvremenih višekriterijskih optimizacijskih metoda kao što su metode "višeatributne ili višeciljne sinteze projekta" ("multiattribute (MADM) or multiobjective (MODM) decision making").

U ovom je radu korišten program za višeatributno optimiranje razvijen na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Primijenjena višekriterijska optimizacijska metoda je detaljno opisana u [18,19,20,21,22,23,24].

Njena primjena omogućava projektantu kvalitetno korištenje raspoloživog vremena: ispitivanje kvalitete pojedinih projektnih rješenja s obzirom na postignuta projektna svojstva ("design attributes"), odnosno na analizu dobivenih optimalnih nedominiranih projekata te koncentriranje na konačni izbor jednog od njih (preferirano rješenje).

8.1. Osnovni opis primijenjene metode optimiranja

Primijenjenom optimizacijskom metodom se točke iz projektnog prostora, kojeg razapinju projektne varijable, matematičkim projektnim modelom preslikavaju u prostor zavisnih projektnih svojstava - atributa. Bilo koje projektno rješenje je predstavljeno točkom u višedimenzijskom prostoru projektnih varijabli. Projektna ograničenja omeđuju unutar prostora projektnih varijabli područje ostvarivih ("feasible") projekata.

Svakoj je točki iz prostora projektnih varijabli pridružena točka iz prostora zavisnih projektnih svojstava - atributa. Svaka pojedina točka iz prostora projektnih varijabli se prenosi u prostor zavisnih projektnih svojstava matematičkim projektnim modelom te joj se pridružuje odgovarajuća točka, odnosno skup zavisnih projektnih svojstava. Isto tako, svaka točka iz prostora zavisnih projektnih svojstava predstavlja jedno ili više projektnih rješenja i pridružene su im odgovarajuće točke iz prostora projektnih varijabli.

Rezultat ovog optimizacijskog procesa može biti optimalno, uspješno (efikasno) ili zadovoljavajuće (satisficing) rješenje.

Rješenje kod kojeg su sva projektna svojstva simultano dosegla svoj optimum vrlo se rijetko može postići u višekriterijskim problemima. Idealno rješenje ("utopija") je u pravilu nedosezivo i predstavljeno je točkom u kojoj su dosegnuti ciljani ekstremi (bilo maksimumi ili minimumi) svih kriterija. Njegov antipod, antiutopija (nadir) je rješenje koje je najudaljenije od idealnog.

Uspješna rješenja su ona koja su nedominirana, odnosno bolja od bilo kojeg drugog ostvarivog rješenja prema bar jednom kriteriju. Njihovo je osnovno svojstvo da ne postoji nijedno drugo rješenje u kojem poboljšanje jednog kriterija neće uzrokovati pogoršanje barem jednog od preostalih.

Zadovoljavajuća rješenja su sva ona koja ispunjavaju osnovne projektne zahtjeve.

Preferiranim rješenjem nazivamo ono koje najbolje ispunjava projektantove subjektivne prioritete i odabrano je između uspješnih ili zadovoljavajućih rješenja.

Zadavanje preferencija unutar projektnog prostora se dijeli na dva segmenta: određivanje preferencija među pojedinim zavisnim projektnim svojstvima (atributa) čime definiramo međusobni odnos "značaja" pojedinog para atributa i određivanje preferencija unutar svakog zavisnog projektnog svojstva.

8.1.1. Određivanje preferencija među pojedinim atributima

Relativni odnos značaja pojedinih atributa je pitanje subjektivne projektantove procjene. U ovom je radu korištena Saaty-eva metoda koja se zasniva na određivanju međusobnog odnosa značaja dvaju atributa pomoću pondera (vrijednosti od 1 do 9). Sljedećom tablicom su kratko opisani mogući međusobni odnosi među pojedinim atributima.

P_{ij} ($j > i$) (a_i preferiran)	Opis međusobnog odnosa atributa a_i i a_j	$P_{ji} = P_{ij}^{-1}$
1	podjednako značajni	1
3	diskretno preferiran	1/3
5	jako preferiran	1/5
7	izrazito preferiran	1/7
9	potpuno preferiran	1/9

Tablica br. 4. Definicija odnosa među atributima

Međusobni odnosi među svim atributima su definirani matricom subjektivnih relativnih preferencija. Matrica je rezultat međusobne usporedbe pripadnih preferencija svakog pojedinog para atributa.

$$\mathbf{P} = [P_{ij}] \tag{8.1}$$

gdje je:

$$P_{ij} = p_i/p_j \qquad \text{(značaj atributa i / značaj atributa j)} \quad i, j = 1,..NA \text{ (broj atributa)} \tag{8.2}$$

Relativni značaj pojedinog atributa je izražen pripadnim težinskim faktorom. Vektor značaja atributa je definiran kao:

$$\mathbf{p} = \{p_i\} \tag{8.3}$$

U slučaju kad je matrica subjektivnih relativnih preferencija konzistentno definirana, vrijedi sljedeća jednakost:

$$\mathbf{P} \cdot \mathbf{p} = NA \cdot \mathbf{p} \tag{8.4}$$

Projektantu često nije moguće, pogotovo kod većeg broja atributa, potpuno konzistentno definirati sve međusobne odnose među atributima, odnosno postići potpunu konzistentnost matrice **P**. U tom slučaju koristi se normalizirani vlastiti vektor koji odgovara najvećoj vlastitoj vrijednosti λ_{max} sljedećeg problema vlastite vrijednosti:

$$(\mathbf{P} - \lambda \mathbf{I})\, \mathbf{p} = 0 \tag{8.5}$$

gdje su:

λ_i - vlastite vrijednosti problema (i = 1,...NA)

I - jedinična matrica

Stupanj konzistentnosti se određuje sljedećim kriterijem:

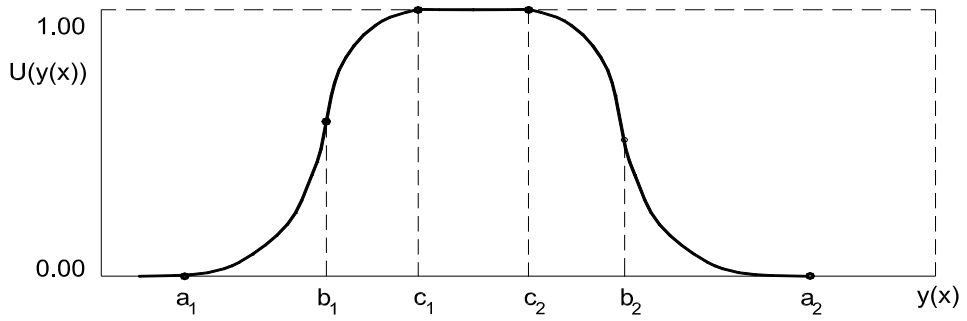
$$C = (\lambda_{max} - NA) / (NA - 1) \qquad \text{s preporukom da bude} < 0.1 \tag{8.6}$$

8.1.2. Određivanje preferencija unutar pojedinog atributa

Određivanje preferencija unutar svakog zavisnog projektnog svojstva se može izvršiti različitim metodama.

U primijenjenom optimizacijskom postupku to je učinjeno primjenom neizrazitih funkcija ("fuzzy functions"). Svakom projektnom svojstvu je pridružena vlastita neizrazita funkcija kojom je definirano područje u kojem još možemo tolerirati "podbačaj" ili "prebačaj" i postignutu subjektivnu mjeru zadovoljenja ("membership grade") u ispunjavanju ciljanog iznosa pojedinog svojstva.

U postupku optimiranja projekta broda oblik i granice neizrazite funkcije ovise isključivo o projektantovoj procjeni. Donjom slikom je prikazan opći oblik neizrazite funkcije ("Ω" oblik).

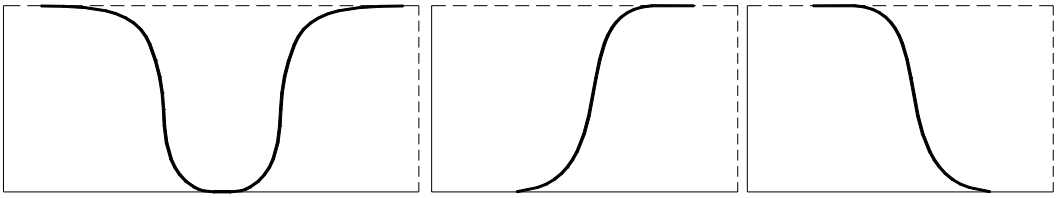


Slika br. 18. Opći oblik neizrazite funkcije ("Ω" oblik)

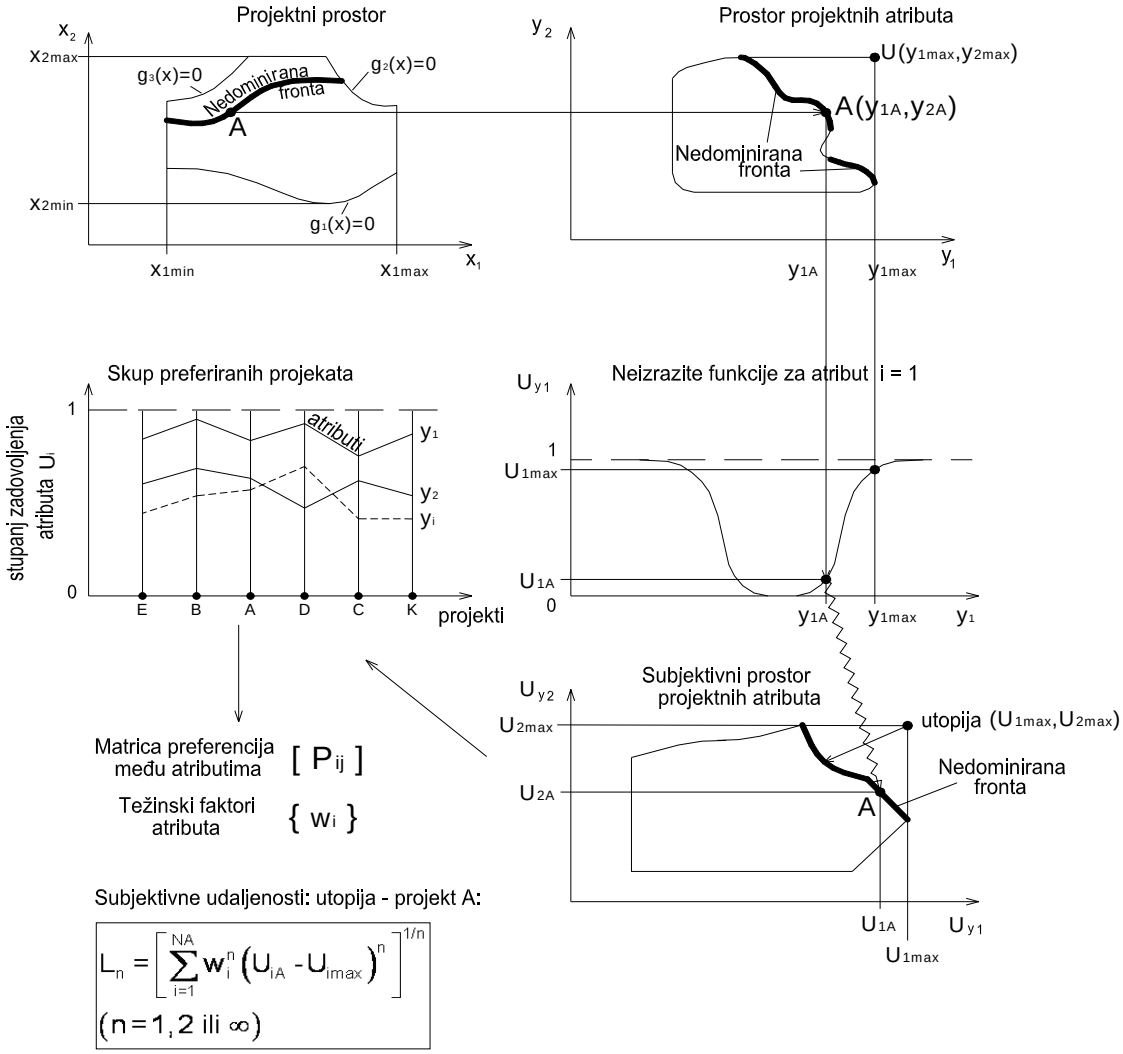
Opći oblik neizrazite funkcije je definiran sljedećim polinomskim skupom [27]:

$$U(y(x)) = \begin{bmatrix} 0 & \text{ako je} & y < a_1 \\ (y-a_1)^2/[(b_1-a_1)(c_1-a_1)] & \text{ako je} & a_1 < y < b_1 \\ 1 - (y-c_1)^2/[(c_1-b_1)(c_1-a_1)] & \text{ako je} & b_1 < y < c_1 \\ 1 & \text{ako je} & c_1 < y < c_2 \\ 1 - (y-c_2)^2/[(b_2-c_2)(a_2-c_2)] & \text{ako je} & c_2 < y < b_2 \\ (y-a_2)^2/[(a_2-b_2)(a_2-c_2)] & \text{ako je} & b_2 < y < a_2 \\ 0 & \text{ako je} & a_2 < y \end{bmatrix} \tag{8.7}$$

Osim prethodno opisanog općeg ("Ω") oblika funkcije, moguća je primjena i drugih oblika: "U" oblika (kad izbjegavamo pojedino područje), "S" oblika (kad gornja granica nije zadana) i "Z" oblika (kad nije zadana donja granica). Ovi su oblici principijelno prikazani sljedećom slikom.



Slika br. 19. "U", "S" i "Z" oblik neizrazitih funkcija



Slika br. 20. Projektni problem

8.2. Identifikacija projektnog problema primjenom metode višeatributne sinteze projekta u optimiranju projekta broda

Projektni postupak opisan u poglavlju 6. i pripadne matematičke modele razrađene u poglavlju 7. će u daljnjem tekstu biti prilagođeni primjeni u opisanoj optimizacijskoj metodi.

8.2.1. Projektne varijable i parametri

Projektne varijable i parametri kod osnivanja broda su sljedeće:

- duljina među okomicama L_{pp},
- širina B,
- maksimalni gaz d_s,
- blok koeficijent C_B,
- indikator odabira tipa porivnog stroja (ukoliko je moguć izbor između dvaju ili više tipova stroja),
- korisna nosivost DW,
- volumen teretnog prostora V_{car},
- brzina na pokusnoj plovidbi v_{tr}.
- specifična voluminoznost broda κ,
- procijenjeni utjecaj upotrebe čelika povišene čvrstoće na smanjenje mase čelične konstrukcije,
- maksimalne snage pojedinih strojeva MCR_i,
- cijene mogućih porivnih strojeva C_{MEi}, prosječna jedinična cijena čelika c_{st} i cijena preostalog materijala i opreme C_{fix},
- proizvodnost brodogradilišta P_{cGT}, jedinična satnica V_L i preostali troškovi C_{pt}.

8.2.2. Projektna ograničenja

Projektne varijable su definirane u granicama projektnog područja (minimalnim i maksimalnim vrijednostima svake pojedine varijable).

- $L_{pp\ min}$, $L_{pp\ max}$,
- B_{min}, B_{max},
- $d_{s\ min}$, $d_{s\ max}$,
- $C_{B\ min}$, $C_{B\ max}$.

U projektna ograničenja spadaju, osim prethodno navedenih min-max ograničenja projektnih varijabli i ograničenja njihovih međusobnih odnosa (poglavlja 6.1.1.2. i 7.1.2.):

- $(L_{pp}/B)_{min}$, $(L_{pp}/B)_{max}$,
- $(L_{pp}/d_s)_{min}$, $(L_{pp}/d_s)_{max}$,
- $(B/d_s)_{min}$, $(B/d_s)_{max}$,
- $(L_{pp}/D)_{min}$, $(L_{pp}/D)_{max}$.

te zadovoljenje uvjeta minimalnog nadvođa, provjera minimalne tražene snage porivnog stroja (u odnosu na maksimalne snage odabranih tipova) i provjera postignute istisnine u odnosu na minimalno potrebnu, odnosno:

- $D \geq ds + freeb$ (8.8)
- $f_5\ SMCR \geq CSR$ (8.9)
- $L_{pp}\ B\ d_s\ \gamma_{tot} \geq LS + DW$ (8.10)

gdje su:

freeb - minimalno nadvođe
γ_{tot} - specifična masa morske vode s uključenim utjecajem oplate broda i privjesaka (uobičajene vrijednosti su 1.027 - 1.029 ovisno o veličini broda)

Pomoću gornjih se ograničenja selektiraju ostvarivi projekti na bazi zadovoljavanja osnovnih projektnih postavki.

8.2.3. Zavisna projektna svojstva (atributi)

Zavisna projektna svojstva (atributi) su veličine koje dobivamo provedbom proračuna projektnog modela i koje zadovoljavamo u okvirima zadanog odstupanja (neizrazitim funkcijama), odnosno sljedeća:

- masa čelične konstrukcije W_{st},
- cijena materijala C_M,
- cijena procesa (rada) C_L,
- cijena izgradnje broda C_{NB},
- korisna nosivost DW,
- brzina na pokusnoj plovidbi v_{tr},
- volumen teretnog prostora V_{car}.

Njima pridružujemo neizrazite funkcije kojima zadajemo područje "mekog" ispunjavanja ciljanih vrijednosti.

Kod veličina koje su predmet ugovornih obaveza (DW, v_{tr}, V_{car}) preporučljivo je odabrati "Ω" oblik neizrazite funkcije - veće odstupanje od vrijednosti zadanih projektnim zahtjevom imaju negativne posljedice.

Značajni podbačaj u njihovom ispunjavanju mogu voditi nepreuzimanju broda od strane brodovlasnika, raskidu brodograđevnog ugovora i slijedom toga, katastrofalnim posljedicama po brodogradilište. Veliki prebačaj u njihovom ispunjavanju ne vodi negativnim efektima tog opsega, ali svakako znači izgradnju "prekvalitetnog" i preskupog broda.

Stoga je preporučljivo postaviti donje granice ispunjenja zadanih vrijednosti na donjim granicama bespenalnih područja, a gornje granice umjereno većim od traženih vrijednosti. Time osiguravamo da eventualno dosezanje donjih granica nema za posljedicu negativne komercijalne efekte po brodogradilište. Eventualno postizanje ovako definiranih gornjih granica brodogradilištu neće donijeti značajne negativne komercijalne efekte.

Kod pridruživanja neizrazite funkcije atributu brzine na pokusnoj plovidbi treba pripaziti da gornja granica ne bude zadana previsoko, jer to može voditi problematičnoj situaciji kod projektiranja brodskog vijka i provedbe modelskih ispitivanja. Također može voditi problemima vezanim uz ispunjavanje zahtjeva za manevrabilnost broda, a u ekstremnim slučajevima i problemima vezanim za dimenzioniranje pojedinih elemenata brodske strukture i opreme.

Određivanje granica je kod preostalih veličina, u pravilu, pitanje slobodne projektantove subjektivne procjene, pa se može, umjesto općeg "Ω" oblika neizrazite funkcije, koristiti "Z" oblik bez zadane donje granice (njihovo minimiziranje ne vodi negativnim efektima).

Minimiziranje mase čelične konstrukcije (pod uvjetima ispunjavanja svih zahtjeva klasifikacijskog društva i prihvaćenih dodatnih zahtjeva brodovlasnika) može imati samo pozitivne efekte za brodogradilište.

Isto tako, minimiziranje cijene izgradnje broda i svih njenih elemenata može imati samo pozitivne efekte kako za brodogradilište, tako i za brodovlasnika.

Uz prethodno navedeno treba zadati numeričke vrijednosti preferencija za parove atributa (generiranje matrice njihovih međusobnih preferencija) na osnovi čega dobivamo konzistentne težinske faktore za svaki atribut.

8.2.4. Projektni ciljevi

Projektni ciljevi su navedeni u poglavlju 6.1.1.5. i detaljno opisani u poglavlju 7.1.5, pa će nadalje biti samo kratko nabrojeni:

- minimiziranje snage porivnog stroja,
- minimiziranje mase čelične konstrukcije,
- minimiziranje cijene materijala broda,
- minimiziranje cijene rada (procesa),
- minimiziranje cijene izgradnje broda.

9. PRIMJERI OSNIVANJA BULK CARRIERA I TANKERA

9.1. Osnivanje Capesize bulk carriera

9.1.1. Pregled suvremenih Capesize bulk carriera

Capesize bulk carrieri su najveći brodovi za prijevoz rasutih tereta. Grade se gotovo isključivo u dalekoistočnim brodogradilištima. Primjeri suvremenih i vrlo kvalitetnih projekata su dani u sljedećoj tablici.

Brodogradilište	IHHI	Sasebo H.I.	Koyo Dock.	Namura	NKK
L_{oa} (m)	289.0	289.0	288.93	287.64	289.0
L_{pp} (m)	277.0	279.0	280.0	277.0	279.0
B (m)	45.0	44.98	45.0	45.0	45.0
D (m)	23.8	24.4	23.8	24.1	24.1
d_s (m)	17.6	17.95	17.6	17.7	17.81
DW (t)	170780	170415	171199	171191	172510
GT	83849	87407	85379	85868	87522
Vol. sklad. (m^3)	186668		188205	191255	191582
Porivni stroj	6RTA72	6S70MC	6S70MC	6S70MC	6S70MC
SMCR (kW/okr)	16040/93	16860/91	16100/87	16370/90.1	14705/80
CSR (kW/okr)	13636/88.1	13700/85	13695/82.4	13910/85.3	12500/75.8
$v_{tr,\ balast}$ (čv)	17.53	16.34	16.79	16.67	
$v_{služba}$ (čv)	14.8	14.5	14.6	14.8	14.7

Tablica br. 5. Suvremeni Capesize bulk carrieri

Iz gornjih se podataka mogu izvući sljedeći zaključci:

- Korisna nosivost se kreće od 170000 do 172500 t;
- Volumen skladišta tereta je 186000 do 191500 m^3;
- Specifična voluminoznost broda je u području od 0.6243 do 0.6367;
- Duljina među okomicama se kreće od 277 do 280 m;
- Širina je u svim projektima ista - 45 (m);
- Gaz se kreće od 16.5 do 17.95 (m);
- Brzina na pokusnoj plovidbi je od 16.3 do 17.5 čv.

9.1.2. Projektni zahtjev

Na osnovi gornjih podataka neka bude postavljen sljedeći projektni zahtjev:

- Korisna nosivost je 172000 t;
- Volumen skladišta tereta je 190000 m^3;
- Maksimalna duljina među okomicama je 280 m;
- Maksimalna širina je 45 m;
- maksimalni gaz je 17.95 m;
- brzina na maksimalnom gazu i u uvjetima pokusne plovidbe će biti 15.2 čv.

9.1.3. Identifikacija projektnog zadatka

9.1.3.1. Projektne varijable i parametri

Identificirajmo sljedeće projektne varijable i parametre:

- duljina među okomicama L_{pp},
- širina B,
- maksimalni gaz d_s,
- blok koeficijent C_B,
- izbor porivnog stroja svedimo na dva potencijalna:
    - MAN B&W 5S70MC-C,
    - MAN B&W 6S70MC-C,
- korisna nosivost DW,
- volumen skladišta tereta V_{car},
- brzina broda v_{tr},
- specifična voluminoznost broda $\kappa = 0.64$,
- parametri potrebni za proračun vlastite mase broda:
    a) procijenimo postotak čelika povišene čvrstoće na cca 30%, pa je utjecaj njegove upotrebe na smanjenje ukupne mase čelične konstrukcije oko 5%, odnosno zadajmo faktor $f_1 = 5$;
    b) faktor f_2 zadajmo, u skladu s prikazom na slici br. 12 na iznos od 0.0275;
    c) masu čelične konstrukcije nadgrađa i konstrukcije vezane uz dimnjak procijenimo na $f_3 = 350$ t;
    d) faktor f_4 zadajmo, prema prikazu na slici br. 14 na iznos od 800;
    e) optimirajmo porivni stroj na 90% SMCR-a, odnosno zadajmo faktor f_5 na 0.9;

f) zadajmo faktor f_6, u skladu s prikazom na slici br. 16, na iznos 0.28.

- maksimalne snage i cijene porivnih strojeva:

a) 5S70MC-C (MCR 15550 kW/91 okr/min), C_{ME1} = 5.3 MUSD
b) 6S70MC-C (MCR 18660 kW/91 okr/min), C_{ME2} = 6.0 MUSD

- podaci za proračun cijene materijala i izgradnje broda:

a) prosječna jedinična cijena čelika	c_{st} = 800 USD/t
b) odnos bruto mase čelika i mase čelične konstrukcije	W_{gst}/W_{st} = 1.12
c) cijena preostalog materijala i opreme	C_{fix} = 18.0 MUSD
d) faktor kompenzacije prema tablici br. 3. iznosi	f_c = 0.3
e) proizvodnost zadajmo na vrijednost od	P_{cGT} = 35 rs/f_cGT
f) jedinična satnica neka bude	V_L = 20 USD/rs
g) preostali troškovi	C_{pt} = 4.0 MUSD

9.1.3.2. Projektna ograničenja

Neka min-max ograničenja sa koracima unutar područja budu zadana kao:

$265 \leq L_{pp} \leq 280$ m,	korak 1.0 m
$43 \leq B \leq 45$ m	korak 0.2 m
$17.5 \leq d_s \leq 17.95$ m	korak 0.05 m
$0.85 \leq C_B \leq 0.875$	korak 0.0025

Zadajmo sljedeća ograničenja odnosa osnovnih izmjera:

$$5.8 \leq L_{pp}/B \leq 6.5$$
$$15.3 \leq L_{pp}/d_s \leq 16.2$$
$$2.3 \leq B/d_s \leq 2.7$$
$$11.0 \leq L_{pp}/D \leq 11.9$$

9.1.3.3. Zavisne projektne veličine (atributi)

Ponovimo atribute navedene i opisane u poglavljima 6.1.1.4. i 7.1.4:

- masa čelične konstrukcije W_{st},
- cijena materijala C_M,
- cijena procesa (rada) C_L,
- cijena izgradnje broda C_{NB},
- korisna nosivost DW,
- brzina na pokusnoj plovidbi v_{tr},
- volumen teretnog prostora V_{car}.

U skladu s optimizacijskom metodom opisanom u poglavlju 8. zadajmo sljedeću matricu subjektivnih relativnih preferencija među pojedinim atributima (poglavlje 8.1.1.):

	W_{st}	C_M	C_L	C_{NB}	DW	v_{tr}	V_{car}
W_{st}	1	1/3	1/3	1/5	3	3	3
C_M	3	1	1	1/5	5	5	5
C_L	3	1	1	1/5	3	3	3
C_{NB}	5	5	5	1	5	5	5
DW	1/3	1/5	1/3	1/5	1	1	1
v_{tr}	1/3	1/5	1/3	1/5	1	1	1
V_{car}	1/3	1/5	1/3	1/5	1	1	1

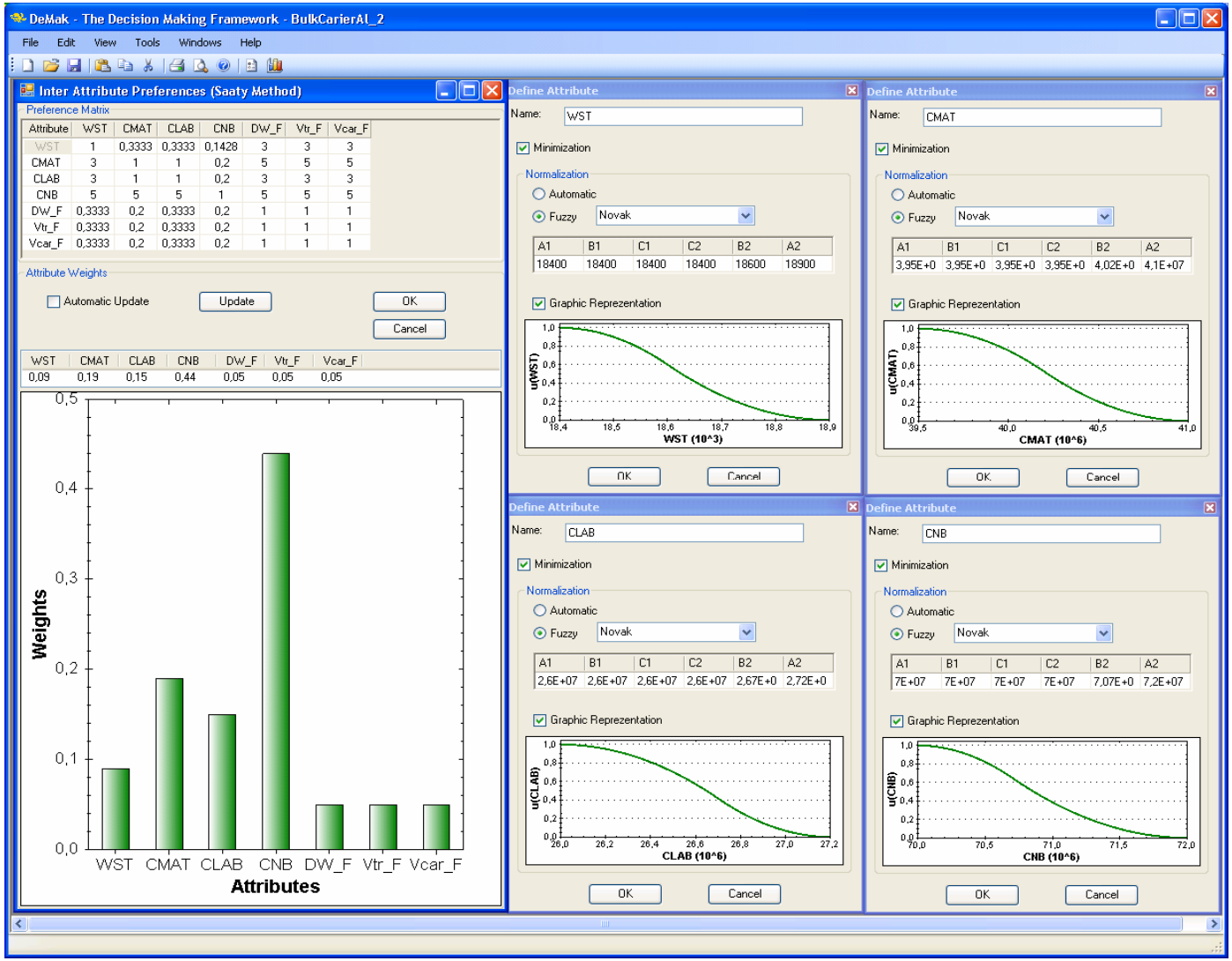
Tablica br. 6. Zadane preferencije među atributima

Zadajmo pripadne neizrazite funkcije za pojedine projektne varijable kako slijedi (poglavlja 8.1.2. i 8.2.4.):

Atribut	Tip funkcije	a_1	b_1	c_1	c_2	b_2	a_2
DW (t)	Ω	171000	171300	171800	172000	172700	173000
v_{tr} (čv)	Ω	14.8	15.0	15.1	15.3	15.4	15.6
V_{car} (m^3)	Ω	189500	189800	189900	190100	190200	190500
W_{st} (t)	Z				18000	18400	18700
C_M (MUSD)	Z				39.0	40.0	41.0
C_L (MUSD)	Z				26.0	26.7	27.0
C_{NB} (MUSD)	Z				70.0	70.7	72.0

Tablica br. 7. Zadane neizrazite funkcije

Narednom slikom su grafički prikazani težinski faktori pojedinih atributa i neizrazite funkcije četiriju atributa (mase čelične konstrukcije W_{st}, cijene materijala C_M, cijene rada C_L i cijene koštanja novogradnje C_{NB}). Neizrazite funkcije preostalih triju atributa (korisne nosivosti DW, brzine broda v_{tr} i volumena skladišta tereta V_{car}) se optimiraju (maksimiziraju) u neizrazitom (fuzzy) obliku. Njihov grafički prikaz nema fizikalnog značenja, pa stoga nisu ni prikazane.



Slika br. 21.

Grafički prikaz preferencija

9.1.3.4. Projektni ciljevi

Sukladno poglavljima 6.1.1.5. i 7.1.5. mogu se identificirati sljedeći projektni ciljevi:

- minimizirati masu čelične konstrukcije,
- minimizirati snagu porivnog stroja,
- minimizirati cijenu materijala broda,
- minimizirati cijenu rada (procesa),
- minimizirati cijenu izgradnje broda.

9.1.4. Približni proračun minimalnog nadvođa

Približni proračun minimalnog sniženog nadvođa (B-60) za tipičnu konfiguraciju Capesize bulk carriera obuhvaća sljedeći postupak:

1. Duljinu broda za potrebe proračuna minimalnog nadvođa možemo približno odrediti kao duljinu među okomicama povećanu za 1 m, odnosno:

$$L_F = L_{pp} + 1 \text{ (m)} \tag{9.1}$$

2. Tablično B nadvođe opišimo u području zadanih duljina približnim izrazom:

$$F_{tB} = 4227 + 12.067 (L_F - 266) \text{ (mm)} \tag{9.2}$$

3. Tablično A nadvođe opišimo u području zadanih duljina približnim izrazom:

$$F_{tA} = 3106 + 5.0 (L_F - 266) \text{ (mm)} \tag{9.3}$$

4. Sniženo (B-60) tablično nadvođe:

$$F_{tB\text{-}60} = F_{tB} - 0.6 (F_{tB} - F_{tA}) \text{ (mm)} \tag{9.4}$$

5. Blok koeficijent na 0.85% visine broda na boku aproksimirajmo sljedećim izrazom (prema svojstvima slične brodske forme):

$$C_{B\,0.85D} = 0.9963\, C_B [1 + 0.005285 (0.85D - d_s)] \tag{9.5}$$

6. Korekcija za blok koeficijent:

$$C_{CB} = (C_{B\,0.85D} + 0.68)/1.36 \quad (9.6)$$

7. Korekcija za visinu:

$$C_D = 250\,(D - L_F/15 + 0.02)\ (mm) \quad (9.7)$$

8. Korekcija za palubni skok - uslijed pretpostavljenog preluka od 800 (mm):

$$C_{pr} = 0.75\,[200.1\,(L_F/3 + 10) - 1100] / 16\ (mm) \quad (9.8)$$

9. Minimalno nadvođe:

$$F_{B\text{-}60} = C_{CB}\,F_{tB\text{-}60} + C_D + C_{pr}\ (mm) \quad (9.9)$$

9.1.5. Proračun minimalne snage porivnog stroja

Da bismo mogli što kvalitetnije odrediti funkciju aproksimacije za trajnu snagu u službi, unutar prethodno navedenih granica projektnog područja, potrebno je izraditi bazu podataka.

Baza podataka je izrađena na način da su rezultati SEAKING-ovog proračuna za snagu isporučenu brodskom vijku prvo uvećani za mehaničke gubitke, a zatim korelirani na bazi iskustvenih podataka u korištenju SEAKING-ovog programa i ostvarenih rezultata na pokusnim plovidbama (suvremene, optimirane brodske forme postižu za 0.3 do 0.6 uzlova veću brzinu od one prognozirane SEAKING-ovim programom). Za bazu podataka su korišteni rezultati oko 140 proračuna brzine brodova unutar sljedećeg područja:

$$185000 \le V_{reb} \le 192000\ m^3$$
$$14.8 \le v_{tr} \le 15.4\ čv$$
$$265 \le L_{pp} \le 280\ m$$
$$43 \le B \le 45\ m$$
$$17.5 \le d_s \le 17.95\ m$$
$$0.85 \le C_B \le 0.875$$

i očekivane okretaje vijka od oko 82 okr/min.

Rezultat regresijske analize je dao sljedeći iznose slobodnih parametara:

$a_1 = 5.170595031 * 10^{-3}$
$a_2 = -1.464815990 * 10^{-1}$
$a_3 = 1.072448001$
$a_4 = 8.145480005 * 10^{-1}$
$a_5 = 3.842828000$
$a_6 = 3.589041001$
$a_7 = 6.634233847 * 10^{-4}$

pa je funkcija aproksimacije trajne snage u službi definirana kako slijedi:

$$CSR = 0.005170595031\ L_{pp}^{-0.1464815990}\ B^{1.072448001}\ d_s^{0.8145480005}\ C_B^{3.842828000}\ v_{tr}^{3.589041001}\ (1 + 0.0006634233847\ L_{pp}/d_s) \quad (9.10)$$

Procjena trajne snage u službi za potrebe određivanja snage porivnog stroja (a ne i mase strojo opreme) u slučaju izbora MAN B&W 5S70MC-C treba biti uvećana za 2-3% zbog slabije efikasnosti propulzijskog sustava pri višim okretajima (očekivani okretaji za taj slučaj su oko 90 okr/min).

9.1.6. Proračun cijene broda

Da bismo bili u mogućnosti izračunati cijenu broda u skladu s proračunom iz poglavlja 7.6, moramo još odrediti ukupni zatvoreni volumen broda V. Definirajmo ga na sljedeći način:

$$V = V_{reb} + V_{pr} + V_{nad}\ (m^3) \quad (9.11)$$

gdje su

V_{reb} - volumen trupa broda do visine na boku (m^3);
V_{pr} - volumen preluka (m^3);
V_{nad} - volumen nadgrađa, konstrukcije ispod dimnjaka, grotala tereta i poklopaca (m^3).

Volumen trupa broda do visine na boku je definiran na sljedeći način:

$$V_{reb} = L_{pp}\ B\ D\ C_{BD}\ (m^3) \tag{9.12}$$

gdje je C_{BD} blok koeficijent na visini broda na boku, definiran za ovaj slučaj sljedećom aproksimacijom (prema svojstvima slične brodske forme):

$$C_{BD} = C_B\ [1 + 0.005285\ (D - d_s)] \tag{9.13}$$

Volumen preluka i nadgrađa zadajmo kako slijedi:

$V_{pr} = 5000\ m^3$

$V_{nad} = 11000\ m^3$

9.1.7. Prikaz i diskusija rezultata

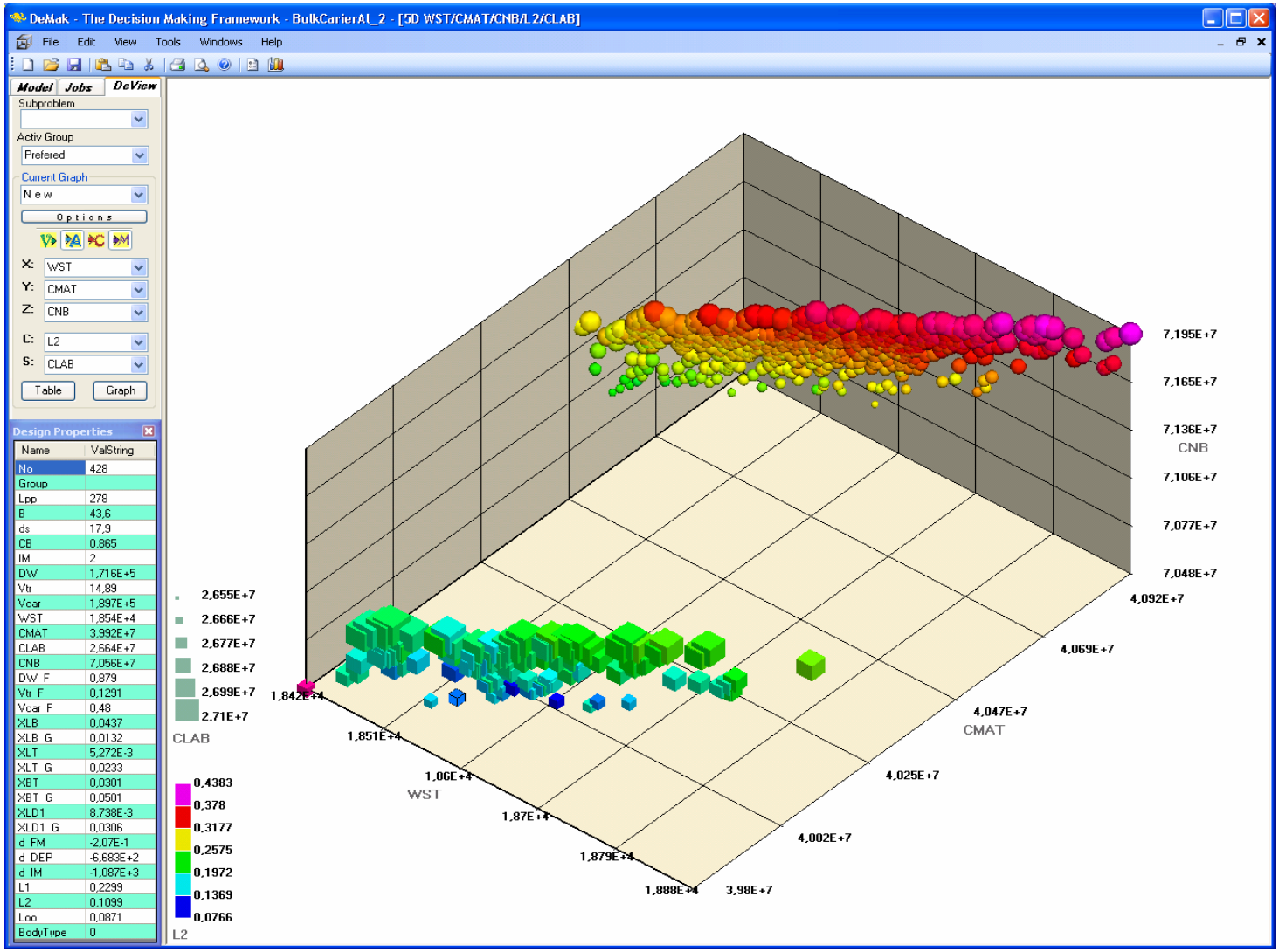
Rezultat provedenog optimizacijskog postupka je određeni broj optimalnih nedominiranih projekata. Narednom slikom su prikazani optimalni nedominirani projekti u trodimenzionalnom koordinatnom sustavu s masom čelika W_{st}, cijenom materijala C_M i cijenom novogradnje C_{NB} na pojedinim koordinatama. Oblikom oznake pojedinog projekta (kocka ili kugla) je označen pripadni porivni stroj (projekti označeni kockom imaju porivni stroj 5S70MC-C, a kuglom 6S70MC-C). Veličina kocke, odnosno kugle predstavlja cijenu rada (niža cijena je predstavljena manjom kockom, odnosno kuglom). Time je definiran petodimenzijski prostor projektnih ciljeva. Spektrom boja je prikazana udaljenost od utopije.

Može se uočiti da su projekti grupirani u dvije velike skupine u odnosu na odabrani porivni stroj (dolje lijevo su projekti označeni kockom koje karakteriziraju petocilindarski porivni strojevi, a gore desno su projekti označeni kuglom koje karakteriziraju šestocilindarski porivni strojevi). Projekti sa manjim porivnim strojem su bliži utopiji (obojeni su modrom, plavom i zelenom bojom), što znači da je cijena novogradnje dominantna i preferirana u odnosu na ostale projektne atribute. To vodi zaključku da je skok u cijeni porivnog stroja od većeg utjecaja na ukupnu cijenu novogradnje nego ostali utjecajni faktori. Razlika u cijeni porivnih strojeva je u poglavlju 9.1.3.3. zadana na razini od 0.7 MUSD, što razlika u cijeni čelika i cijeni rada ne može doseći.

U lijevom donjem uglu se prikazuju podaci bilo kojeg od nedominiranih projekata sa slike. U gornjem lijevom uglu rekapitulirane su veličine koje definiraju prikazani petodimenzijski prostor.

Slika br. 22.

Optimalni nedominirani projekti

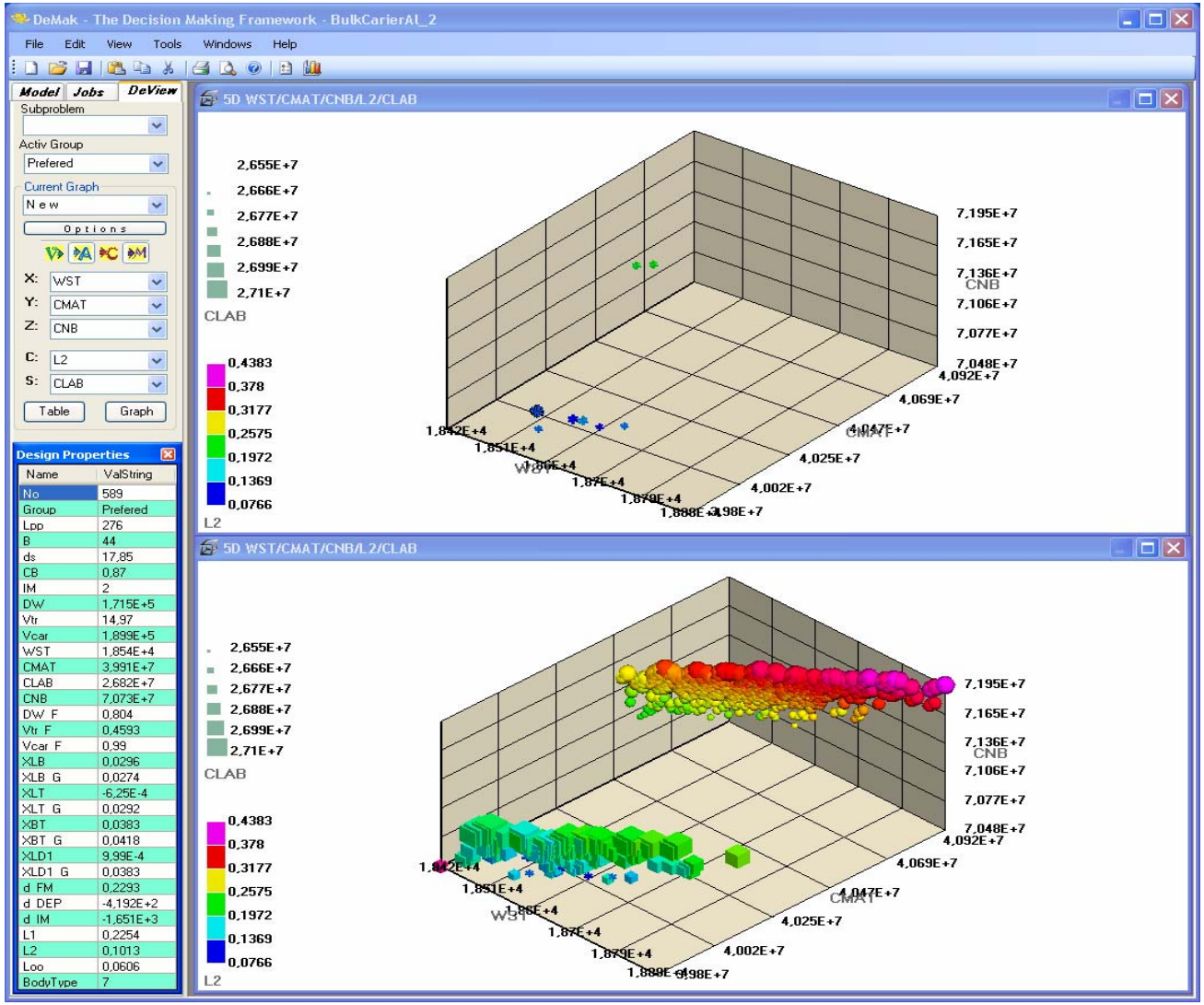


Na donjem dijelu naredne slike je ponovljena prethodna slika, odnosno prikazani su nedominirani projekti u trodimenzijskom koordinatnom sustavu s masom čelika W_{st}, cijenom materijala C_M i cijenom novogradnje C_{NB} na pojedinim koordinatama. Oblikom oznake pojedinog projekta (kocka ili kugla) je označen pripadni porivni stroj (projekti označeni kockom imaju porivni stroj 5S70MC-C, a kuglom 6S70MC-C). Veličina kocke, odnosno kugle predstavlja cijenu rada (niža cijena je predstavljena manjom kockom, odnosno kuglom). Time smo definirali petodimenzijski prostor projektnih ciljeva. Spektrom boja je prikazana udaljenost od utopije.

Na gornjem dijelu slike su prikazani samo oni projekti koji su preferirani po nekom kriteriju - u ovom slučaju šest projekata koji su po odabranoj metrici najbliži utopiji, dva najbolja sa većim porivnim strojem i svi su označeni trodimenzionalnim križićima.

Na lijevoj strani slike su prikazani podaci jednog od prikazanih projekata.

Važno je napomenuti da je u radu s korištenim optimizacijskim programom moguće na različite načine definirati prostor u kojemu su projekti prikazani, selektirati preferirane projekte prema različitim kriterijima i dobiti alfanumeričke podatke za bilo koji prikazani projekt. Koordinatni sustav se može slobodno okretati u prostoru i postaviti u položaj (ili položaje) u kojem se najbolje uočavaju pojedina svojstva projekata.

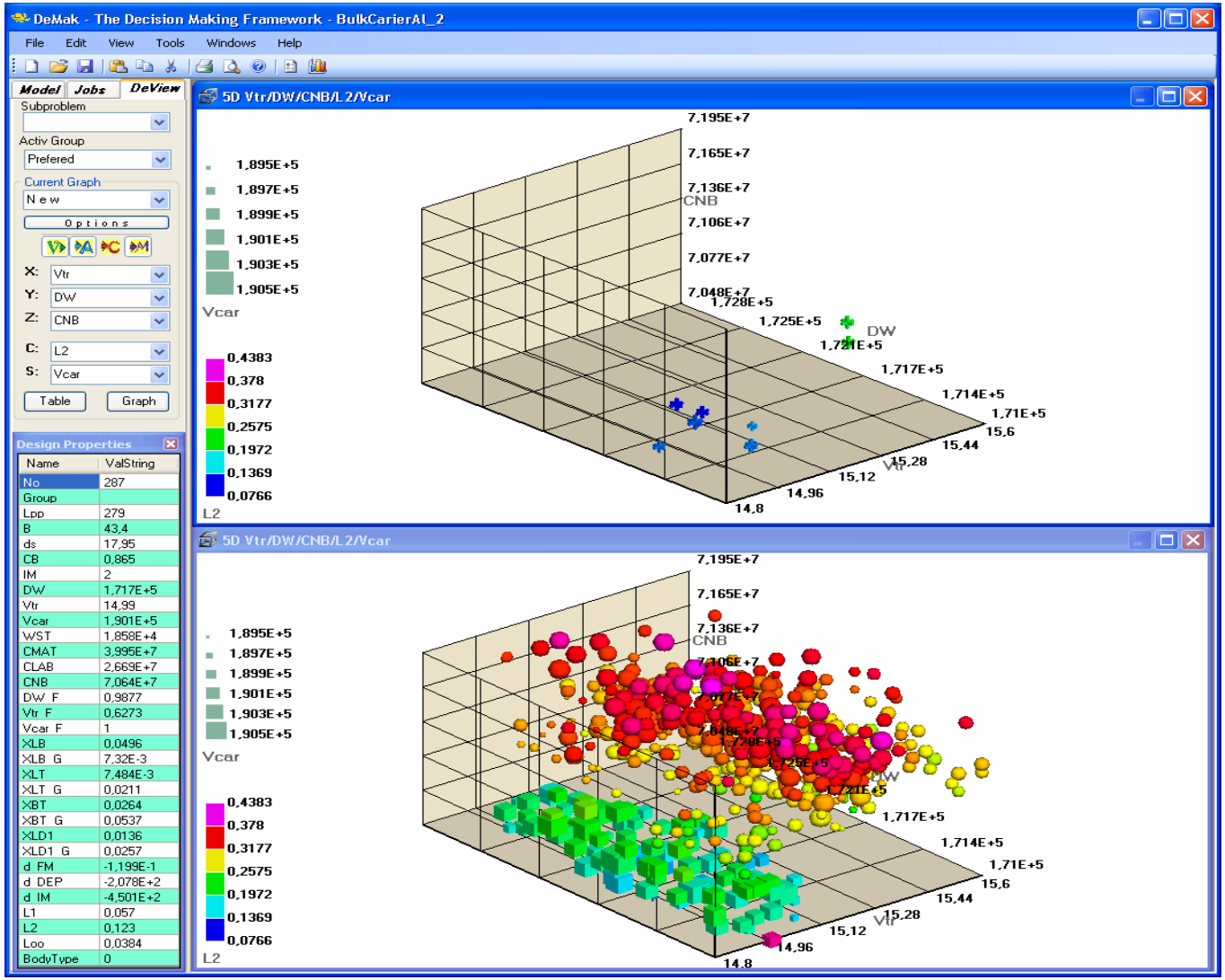


Slika br. 23.

Optimalni
nedominirani projekti

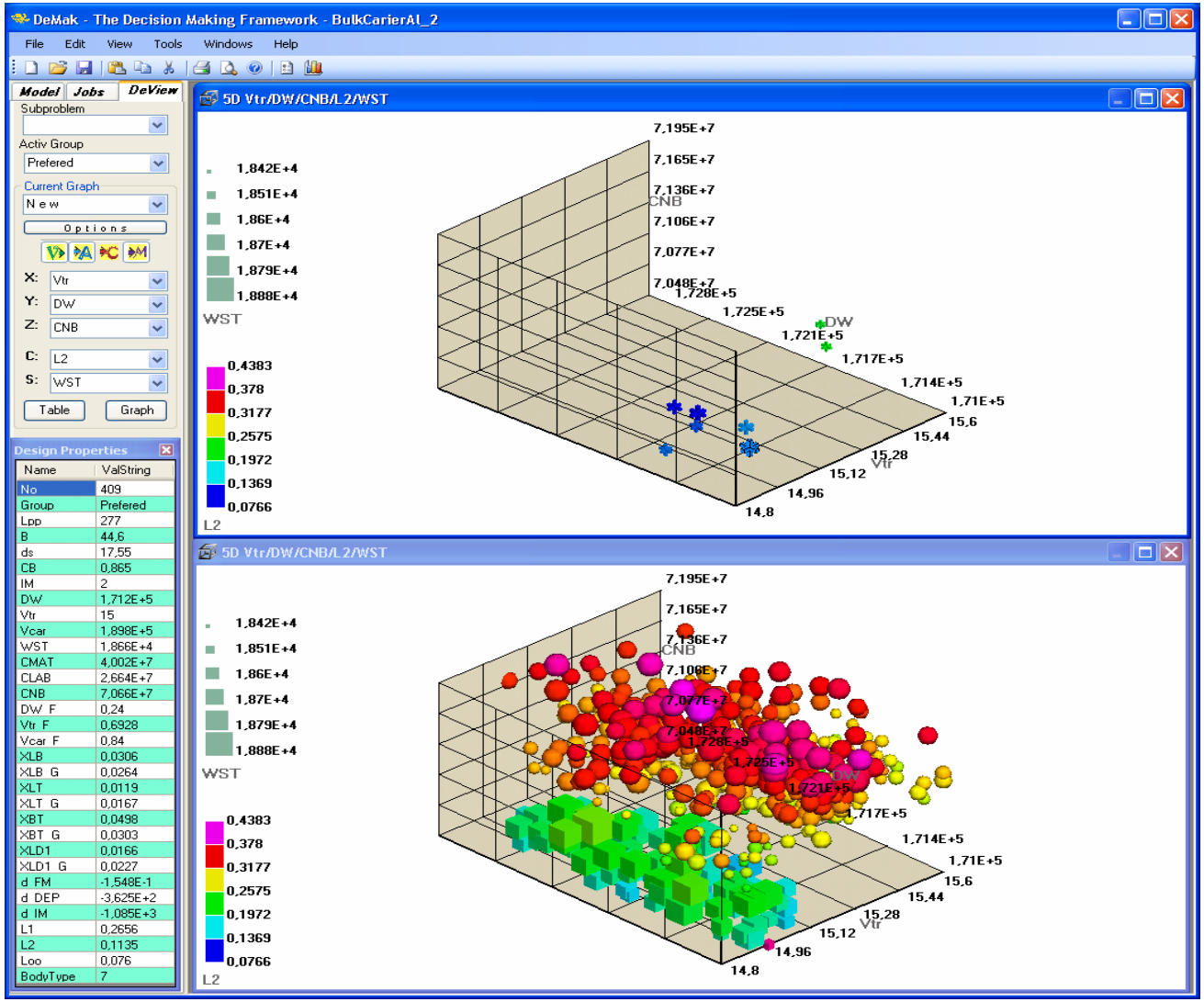
Sljedećim dvama slikama su prikazani optimalni nedominirani projekti u koordinatnim sustavima: brzina na pokusnoj plovidbi v_{tr}, korisna nosivost DW i cijena novogradnje C_{NB} s volumenom skladišta tereta prikazanom dimenzijom veličine oznake, odnosno brzina na pokusnoj plovidbi v_{tr}, korisna nosivost DW i cijena novogradnje C_{NB} s masom čelične konstrukcije prikazanom dimenzijom veličine oznake.

Iz tih se slika također može lijepo uočiti podjela projekata u dvije velike skupine prema odabranom porivnom stroju. Za obje slike je karakteristično da modrom, plavom i zelenom bojom označeni projekti s manjim porivnim strojem (bliži su idealnom rješenju). Veličina kugle, odnosno kocke (volumen teretnih tankova, odnosno mase čelične konstrukcije) je prilično ravnomjerno raspoređena, što vodi zaključku da ispunjavanje ovih zahtjeva u okviru zadanih pripadnih neizrazitih funkcija nema značajan utjecaj na cijenu novogradnje kao dominantni atribut.



Slika br. 24.

Optimalni nedominirani projekti



Slika br. 25.

Optimalni nedominirani projekti

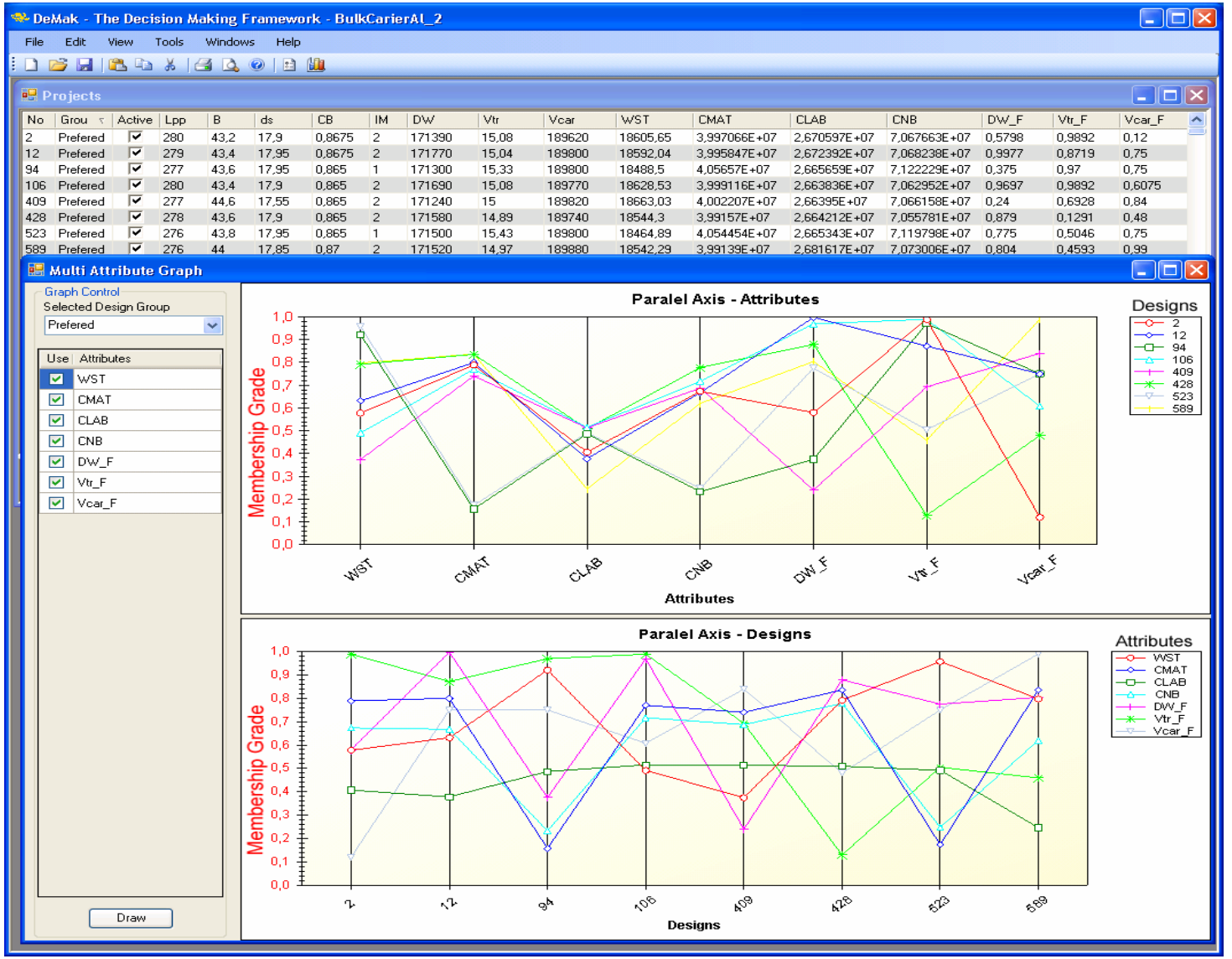
Sljedećom slikom je prikazan subjektivni prostor projektnih atributa. U donjem dijelu slike je prikazano preferiranih osam projekata u odnosu na subjektivnu kvalitetu ispunjavanja pojedinih projektnih atributa. Od preferiranih osam projekata šest ih je selektirano prema minimalnoj udaljenosti od utopije, a preostala dva su najbolja od projekata s većim porivnim strojem. Na jednom su dijagramu projekti prikazani različitim bojama, a atributi su poredani na apscisi, dok su na drugom dijagramu uloge zamijenjene.

U gornjem dijelu slike je prikazana tablica alfanumeričkih podataka svih preferiranih projekata.

Ponovno se može uočiti da cijena porivnog stroja dominira u ukupnoj cijeni materijala, dok su razlike u cijeni rada (procesa) manjeg opsega.

Kod eventualnog izbora projekta koji ispunjava pojedine projektne atribute (pogotovo one čije je ispunjavanje ujedno i ugovorna obveza - korisna nosivost DW, brzina v_{tr} i volumen teretnih skladišta V_{car}) na pripadajućim donjim granicama subjektivnog zadovoljstva, treba u daljnjoj fazi projektiranja "ugroženim" atributima posvetiti adekvatnu pažnju.

Prikazane slike pružaju projektantu informacije nužne za konačni izbor jednog od nedominiranih, odnosno subjektivno preferiranih projekata.



Slika br. 26.

Subjektivno odlučivanje putem paralelnih osi

Izaberimo projekt s najnižom cijenom gradnje kao subjektivno preferirani, što je sa strane brodogradilišta poželjno projektno rješenje. Prethodnom slikom je prikazan kao odabir projekt br. 428: na gornjem dijagramu je prikazan zelenom crtom s križićima i ima najveći iznos na ordinati cijene novogradnje, a na donjem je dijagramu cijena novogradnje označena plavom crtom s trokutićima najviša na ordinati projekta br. 428. Osnovne karakteristike projekta su slijedeće:

L_{pp} = 278.0 m
B = 43.6 m
d_s = 17.9 m
D = 24.46 m
C_B = 0.865
DW = 171580 t
v_{tr} = 14.89 čv
V_{car} = 189740 m^3
W_{st} = 18544 t
Porivni stroj MAN B&W 5S70MC-C
C_M = 39.916 MUSD
C_L = 26.642 MUSD
C_{NB} = 70.558 MUSD

Obzirom na projektni zahtjev može se uočiti da preferirani projekt diskretno podbacuje u ispunjavanju korisne nosivosti i volumena teretnih skladišta, a da je blizu zadane donje granice ispunjen zahtjev za brzinom. Takva kvaliteta preferiranog projekta se mogao i očekivati, jer ovakvo rješenje minimizira cijenu novogradnje koja je zadana kao dominantna kod određivanja međusobnih odnosa između projektnih atributa.

U odnosu na suvremene projekte Capesize bulk carrier-a prikazane tablicom br. 5 može se komentirati da je preferirani projekt po osnovnim svojstvima i pogotovo komercijalnim efektima (manji i jeftiniji porivni stroj) superioran svim prikazanim projektima.

9.2. Osnivanje Handymax product tankera

9.2.1. Pregled suvremenih Handymax product tankera

Najkvalitetniji suvremeni Handymax product tankeri se grade u dalekoistočnim i hrvatskim brodogradilištima. Stoga su u sljedećoj tablici prikazani primjeri triju kvalitetnih novogradnji izgrađenih u japanskim brodogradilištima i dvaju izgrađenih u hrvatskim.

Brodogradilište	Mizushima	Onomichi	Shin Kurus.	Brodosplit	Brodotrogir
L_{oa} (m)	182.0	182.5	179.88	183.4	182.5
L_{pp} (m)	174.0	172.0	172.0	175.0	174.8
B (m)	32.20	32.20	32.20	32.0	32.20
D (m)	17.80	19.10	18.70	17.95	17.50
d_s (m)	12.65	12.65	12.0	12.0	12.2
DW (t)	48338	47131	45908	44881	47400
GT	27185	28534	28077	27533	27526
Vol. tank. (m^3)	52180	53609	53562	55926	53100
Porivni stroj	6RTA48T	6S50MC	6UEC60LA	6S50MC	6S50MC
SMCR (kW/okr)	8160/124	8580/127	9267/110	8240/122	8310/123
CSR (kW/okr)	7460/122.4	7705/123	7877/104	7415/117.8	7480/118.8
$v_{tr,\ balast}$ (čv)	15.35	16.28	16.82	16.5	16.5
$v_{služba}$ (čv)	14.25	15.0	14.6	14.5	14.7

Tablica br. 8. Suvremeni Handymax product tankeri

Iz gornjih se podataka mogu izvući sljedeći zaključci:

- Korisna nosivost se kreće od 45000 do 48300 t;
- Volumen tankova tereta je 52200 do 56000 m^3;
- Specifična voluminoznost broda je u području od 0.5068 do 0.5564;
- Duljina među okomicama se kreće od 172 do 175 m;
- Širina je u svim projektima, osim Brodosplitovog, ista - 32.2 m;
- maksimalni gaz se kreće od 12.0 do 12.65 m;
- Brzina u službi je od 14.25 do 15.0 čv.

9.2.2. Projektni zahtjev

Na osnovi gornjih podataka možemo postaviti sljedeći projektni zahtjev:

- Korisna nosivost je 50000 t;
- Volumen tankova tereta je 58000 m^3;
- Maksimalna duljina preko svega je 182.88 m, a među okomicama je 174.8 m;
- Maksimalna širina je 32.24 m;
- maksimalni gaz je 12.65 m;
- brzina na maksimalnom gazu i u uvjetima pokusne plovidbe će biti 15.0 čv.

9.2.3. Identifikacija projektnog zadatka

9.2.3.1. Projektne varijable i parametri

Identificirajmo sljedeće projektne varijable i parametre:

- duljina među okomicama L_{pp},
- širina B,
- maksimalni gaz d_s,
- blok koeficijent C_B,
- izbor porivnog stroja svedimo na dva potencijalna:
    - MAN B&W 6S50MC-C,
    - MAN B&W 7S50MC-C,
- korisna nosivost DW,
- volumen tankova tereta V_{car},
- brzina broda v_{tr},
- specifična voluminoznost broda $\kappa = 0.56$;

- parametri potrebni za proračun vlastite mase broda:

    a) procijenimo postotak čelika povišene čvrstoće na cca 15%, pa je utjecaj njegove upotrebe na smanjenje ukupne mase čelične konstrukcije oko 3%, odnosno zadajmo faktor $f_1 = 3$;
    b) faktor f_2 zadajmo, u skladu s prikazom na slici br. 13 na iznos od 0.033;
    c) masu čelične konstrukcije nadgrađa i konstrukcije vezane uz dimnjak procijenimo na $f_3 = 350$ t;
    d) faktor f_4 zadajmo, prema prikazu na slici br. 15 na iznos od 860;

e) optimirajmo porivni stroj na 90% SMCR-a, odnosno zadajmo faktor f_5 na 0.9;
f) zadajmo faktor f_6, u skladu sa prikazom na slici br. 17, na iznos 0.29.

- maksimalne snage i cijene porivnih strojeva:

a) 6S50MC-C (MCR 9480 kW/127 okr/min), C_{ME1} = 3.3 MUSD
b) 7S50MC-C (MCR 11060 kW/127 okr/min), C_{ME2} = 3.7 MUSD

- podaci za proračun cijene materijala i izgradnje broda:

a) prosječna jedinična cijena čelika	c_{st} = 800 USD/t
b) odnos bruto mase čelika i mase čelične konstrukcije	W_{gst}/W_{st} = 1.15
c) cijena preostalog materijala i opreme	C_{fix} = 12.0 MUSD
d) faktor kompenzacije prema tablici br. 3. iznosi	f_c = 0.8
e) proizvodnost zadajmo na vrijednost od	P_{cGT} = 35 rs/f_cGT
f) jedinična satnica neka bude	V_L = 20 USD/rs
g) preostali troškovi	C_{pt} = 3.0 MUSD

9.2.3.2. Projektna ograničenja

Neka min-max ograničenja s koracima unutar područja budu zadana kao:

$170 \leq L_{pp} \leq 174.8$ m	korak 0.2 m
$32.0 \leq B \leq 32.24$ m	korak 0.04 m
$12.2 \leq d_s \leq 12.65$ m	korak 0.05 m
$0.82 \leq C_B \leq 0.845$	korak 0.001

Zadajmo sljedeća ograničenja odnosa osnovnih izmjera:

$$5.3 \leq L_{pp}/B \leq 5.6$$
$$13.7 \leq L_{pp}/d_s \leq 14.2$$
$$2.5 \leq B/d_s \leq 2.8$$
$$9.2 \leq L_{pp}/D \leq 10.0$$

9.2.3.3. Zavisne projektne veličine (atributi)

Ponovimo atribute navedene i opisane u poglavljima 6.1.1.4. i 7.1.4:

- masa čelične konstrukcije W_{st},
- cijena materijala C_M,
- cijena procesa (rada) C_L,
- cijena izgradnje broda C_{NB},
- korisna nosivost DW,
- brzina na pokusnoj plovidbi v_{tr},
- volumen teretnog prostora V_{car}.

U skladu s optimizacijskom metodom opisanom u poglavlju 8. zadajmo sljedeću matricu subjektivnih relativnih preferencija među pojedinim atributima (poglavlje 8.1.1.):

	W_{st}	C_M	C_L	C_{NB}	DW	v_{tr}	V_{car}
W_{st}	1	1/3	1/3	1/5	3	3	3
C_M	3	1	1	1/5	5	5	5
C_L	3	1	1	1/5	3	3	3
C_{NB}	5	5	5	1	5	5	5
DW	1/3	1/5	1/3	1/5	1	1	1
v_{tr}	1/3	1/5	1/3	1/5	1	1	1
V_{car}	1/3	1/5	1/3	1/5	1	1	1

Tablica br. 9. Zadane preferencije među atributima

Zadajmo pripadne neizrazite funkcije za pojedine projektne varijable kako slijedi (poglavlja 8.1.2. i 8.2.4.):

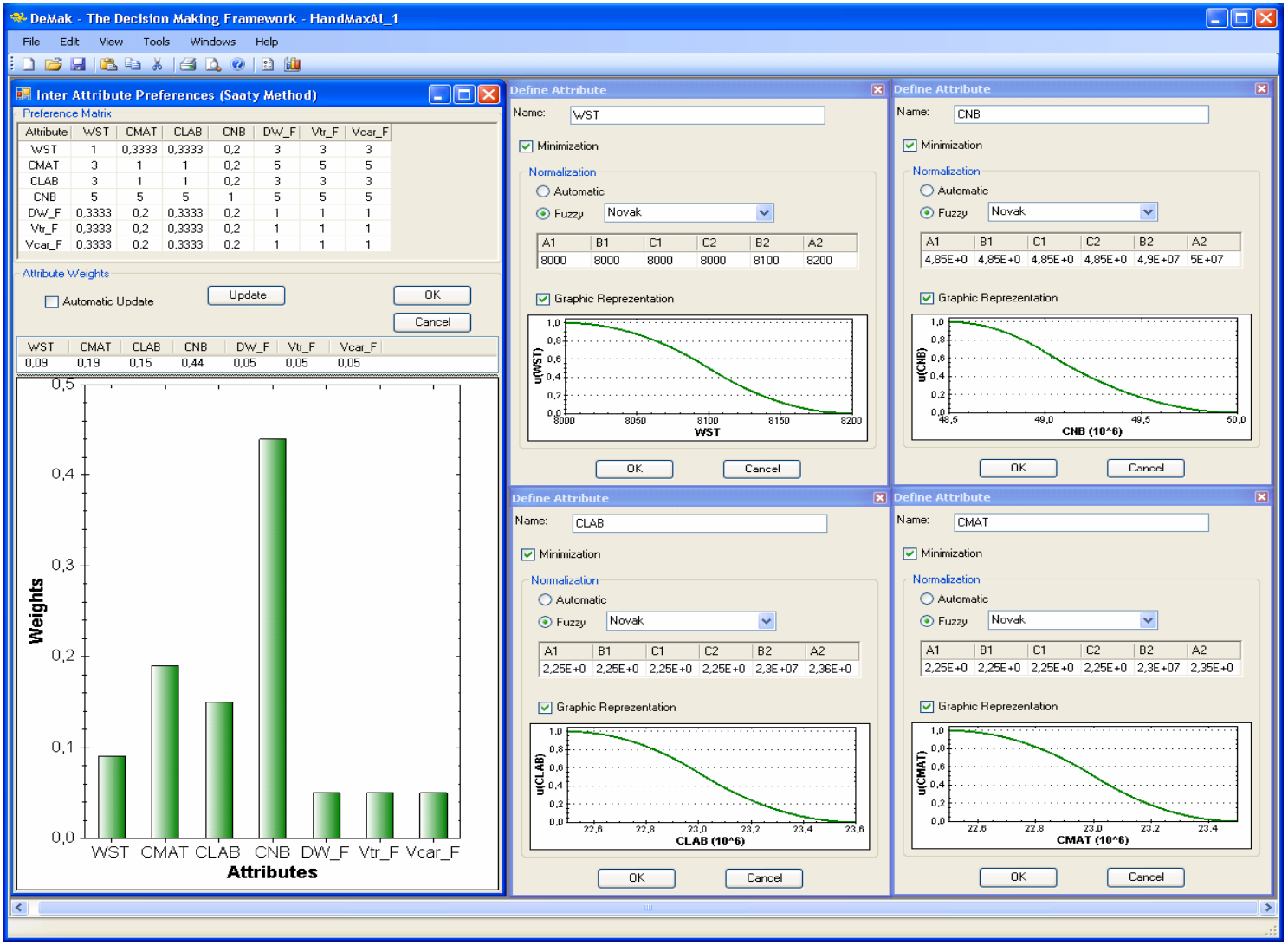
Atribut	Tip funkcije	a_1	b_1	c_1	c_2	b_2	a_2
DW (t)	Ω	49750	49875	50000	50000	50125	50250
v_{tr} (čv)	Ω	14.7	14.8	15.0	15.0	15.2	15.4
V_{car} (m^3)	Ω	57800	57900	58000	58000	58100	58200
W_{st} (t)	Z				8000	8100	8200
C_M (MUSD)	Z				22.5	23.0	23.5
C_L (MUSD)	Z				22.5	23.0	23.5
C_{NB} (MUSD)	Z				48.0	49.0	50.0

Tablica br. 10. Zadane neizrazite funkcije

Narednom slikom su grafički prikazane zadane preferencije među atributima i neizrazite funkcije četiriju projektnih varijabli.

U desnom dijelu slike su prikazani numerički podaci i grafički prikaz neizrazitih funkcija koje su pridružene sljedećim atributima: masi čelične konstrukcije W_{st}, cijeni materijala C_M, cijeni rada (procesa) C_L i ukupnoj cijeni broda C_{NB}. Funkcije su "Z" oblika bez definiranih donjih granica jer kod predmetnih atributa ne postoji mogućnost "nezadovoljstva" pripadnim minimalnim vrijednostima.

Na lijevoj strani slike su prikazani matrica subjektivnih relativnih preferencija među atributima i grafički prikaz pondera pojedinih atributa.



Slika br. 27.

Grafički prikaz preferencija

9.2.3.4. Projektni ciljevi

Sukladno poglavljima 6.1.1.5. i 7.1.5. mogu se identificirati sljedeći projektni ciljevi:

- minimizirati masu čelične konstrukcije,
- minimizirati snagu porivnog stroja,
- minimizirati cijenu materijala broda,
- minimizirati cijenu rada (procesa),
- minimizirati cijenu izgradnje broda.

9.2.4. Približni proračun minimalnog nadvođa

Približni proračun minimalnog nadvođa (A) za konfiguraciju Handymax product tankera s kaštelom obuhvaća sljedeći postupak:

1. Duljinu broda za potrebe proračuna minimalnog nadvođa možemo približno odrediti kao duljinu među okomicama povećanu za 1 m, odnosno:

$$L_F = L_{pp} + 1 \text{ (m)} \tag{9.14}$$

2. Tablično A nadvođe opišimo u području zadanih duljina približnim izrazom:

$$F_{tA} = 2307 + 12.67 (L_F - 173) \text{ (mm)} \tag{9.15}$$

3. Blok koeficijent na 0.85% visine broda na boku aproksimirajmo sljedećim izrazom (prema svojstvima slične brodske forme):

$$C_{B\,0.85D} = 0.9943\, C_B [1 + 0.005686 (0.85D - d_s)] \tag{9.16}$$

4. Korekcija za blok koeficijent:

$$C_{CB} = (C_{B\,0.85D} + 0.68)/1.36 \tag{9.17}$$

5. Korekcija za visinu:

$$C_D = 250 (D - L_F/15 + 0.02) \text{ (mm)} \tag{9.18}$$

6. Korekcija za palubni skok - uslijed pretpostavljenog preluka od 500 mm:

$$C_{pr} = 0.75\ [200.1\ (L_F/3 + 10) - 600] / 16\ (mm) \quad (9.19)$$

7. Korekcija za kaštel

$$C_k = 1070\ [0.7\ l_k/L_F - 0.05(0.07L_F - l_k)/(0.07L_F)]\ (mm) \quad (9.20)$$

8. Minimalno nadvođe:

$$F_A = C_{CB}\ F_{tA} + C_D + C_{sh} - C_k\ (mm) \quad (9.21)$$

9.2.5. Proračun minimalne snage porivnog stroja

Baza podataka je izrađena na sličan način kao u prethodnom primjeru. Rezultati SEAKING-ovog proračuna za snagu isporučenu brodskom vijku su uvećani za mehaničke gubitke te zatim korelirani na bazi iskustvenih podataka u korištenju SEAKING-ovog programa i ostvarenih rezultata na pokusnim plovidbama (može se očekivati 0.4 čvora viša brzina od one prognozirane SEAKING-ovim programom). Za bazu podataka su korišteni rezultati oko 100 proračuna brzine brodova unutar sljedećeg područja:

$$57000 \le V_{reb} \le 60000\ m^3$$
$$14.8 \le v_{tr} \le 15.2\ čv$$
$$170 \le L_{pp} \le 175\ m$$
$$32 \le B \le 32.3\ m$$
$$12.2 \le d_s \le 12.65\ m$$
$$0.82 \le C_B \le 0.845$$

i očekivane okretaje vijka od oko 127 okr/min.

Rezultat regresijske analize je dao sljedeći iznose slobodnih parametara:

$a_1 = 7.996793729 * 10^{-3}$
$a_2 = -5.697164007 * 10^{-2}$
$a_3 = 1.047954665$
$a_4 = 1.140658899 * 10^{-1}$
$a_5 = 3.826400991$
$a_6 = 4.250924690$
$a_7 = -2.913382714 * 10^{-2}$

pa je funkcija aproksimacije trajne snage u službi definirana kako slijedi:

$$CSR = 0.007996793729\ L_{pp}^{-0.05697164007}\ B^{1.047954665}\ d_s^{0.1140658899}\ C_B^{3.826400991}\ v_{tr}^{4.250924690}\ (1 - 0.02913382714\ L_{pp}/d_s \quad (9.22)$$

Procjena trajne snage u službi za potrebe određivanja snage porivnog stroja (a ne i mase strojo opreme) u slučaju izbora MAN B&W 7S50MC-C treba biti snižena za 7-8% zbog bolje efikasnosti propulzijskog sustava pri nižim okretajima (očekivani okretaji za taj slučaj su 100 - 105 okr/min).

9.2.6. Proračun cijene broda

Za izračun cijene broda u skladu s proračunom iz poglavlja 7.6, potrebno je odrediti ukupni zatvoreni volumen broda V. Definirajmo ga na sljedeći način:

$$V = V_{reb} + V_{pr} + V_{nad} + V_k\ (m^3) \quad (9.23)$$

gdje su

V_{reb} - volumen trupa broda do visine na boku (m^3);
V_{pr} - volumen preluka (m^3);
V_{nad} - volumen nadgrađa, konstrukcije ispod dimnjaka (m^3);
V_k = volumen kaštela (m^3).

Volumen trupa broda do visine na boku je definiran kao u prethodnom primjeru:

$$V_{reb} = L_{pp}\ B\ D\ C_{BD}\ (m^3) \quad (9.24)$$

C_{BD} je definiran za ovaj slučaj sljedećom aproksimacijom (prema svojstvima slične brodske forme):

$$C_{BD} = C_B\ [1 + 0.005686\ (D - d_s)] \quad (9.25)$$

Volumen preluka i nadgrađa zadajmo kako slijedi:

$V_{pr} = 1500\ (m^3)$

$V_{nad} = 5000\ (m^3)$

$V_k = 500\ (m^3)$

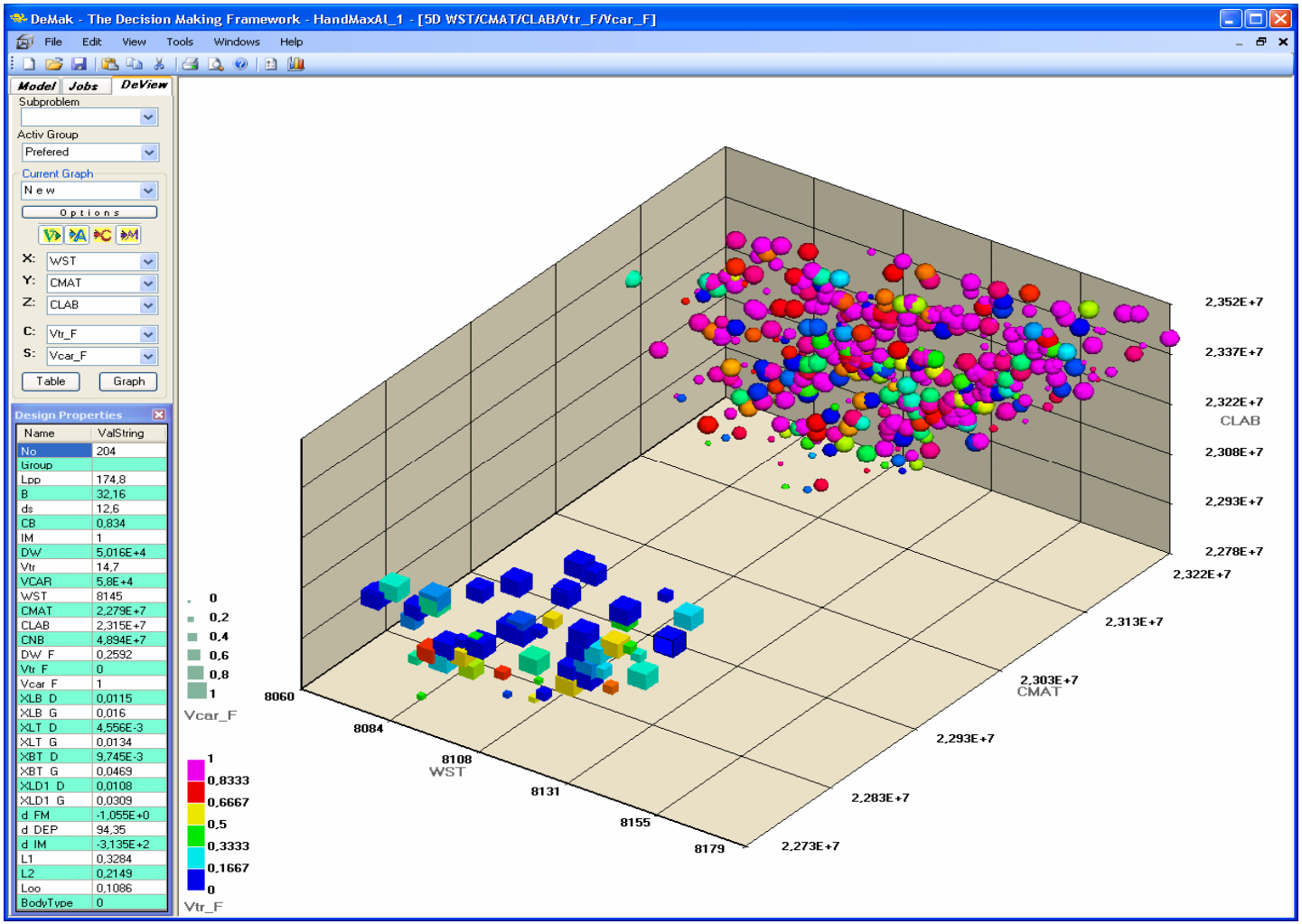
9.2.7. Prikaz i diskusija rezultata

Rezultat provedenog optimizacijskog postupka je određeni broj optimalnih nedominiranih projekata.

Narednom slikom su prikazani optimalni nedominirani projekti u nešto drukčijem koordinatnom sustavu: masa čelične konstrukcije W_{st}, cijena materijala C_M i cijena rada C_L. Oblik oznake je identifikator tipa porivnog stroja (kocka - 6S50MC-C, kugla - 7S50MC-C), veličina oznake je volumen teretnih tankova V_{car}, a boja brzina broda v_{tr}.

Slika je dana kao primjer kakve se sve kombinacije projektnih dimenzija mogu izvesti u svrhu analize međusobnih utjecaja pojedinih atributa. Na ovoj se slici, također, lijepo uočavaju dvije velike skupine projekata podijeljene prema odabranom tipu porivnog stroja (dolje lijevo su projekti označeni kockom koje karakteriziraju šestocilindarski porivni strojevi, a gore desno su projekti označeni kuglom koje karakteriziraju sedmocilindarski porivni strojevi). Projekti s manjim porivnim strojem su bliži utopiji (obojeni su modrom, plavom i zelenom bojom). Slično prethodnom primjeru to znači da je cijena novogradnje dominantna i preferirana u odnosu na ostale projektne atribute, što i u ovom slučaju vodi zaključku da je skok u cijeni porivnog stroja od većeg utjecaja na ukupnu cijenu novogradnje nego ostali utjecajni faktori. Razlika u cijeni porivnih strojeva je u poglavlju 9.2.3.3. zadana na razini od 0.4 MUSD, što razlika u cijeni čelika i cijeni rada ne može doseći.

U lijevom donjem uglu se prikazuju podaci bilo kojeg od nedominiranih projekata sa slike. U gornjem lijevom uglu su rekapitulirane veličine koje definiraju prikazani petodimenzijski prostor.



Slika br. 28.

Optimalni nedominirani projekti

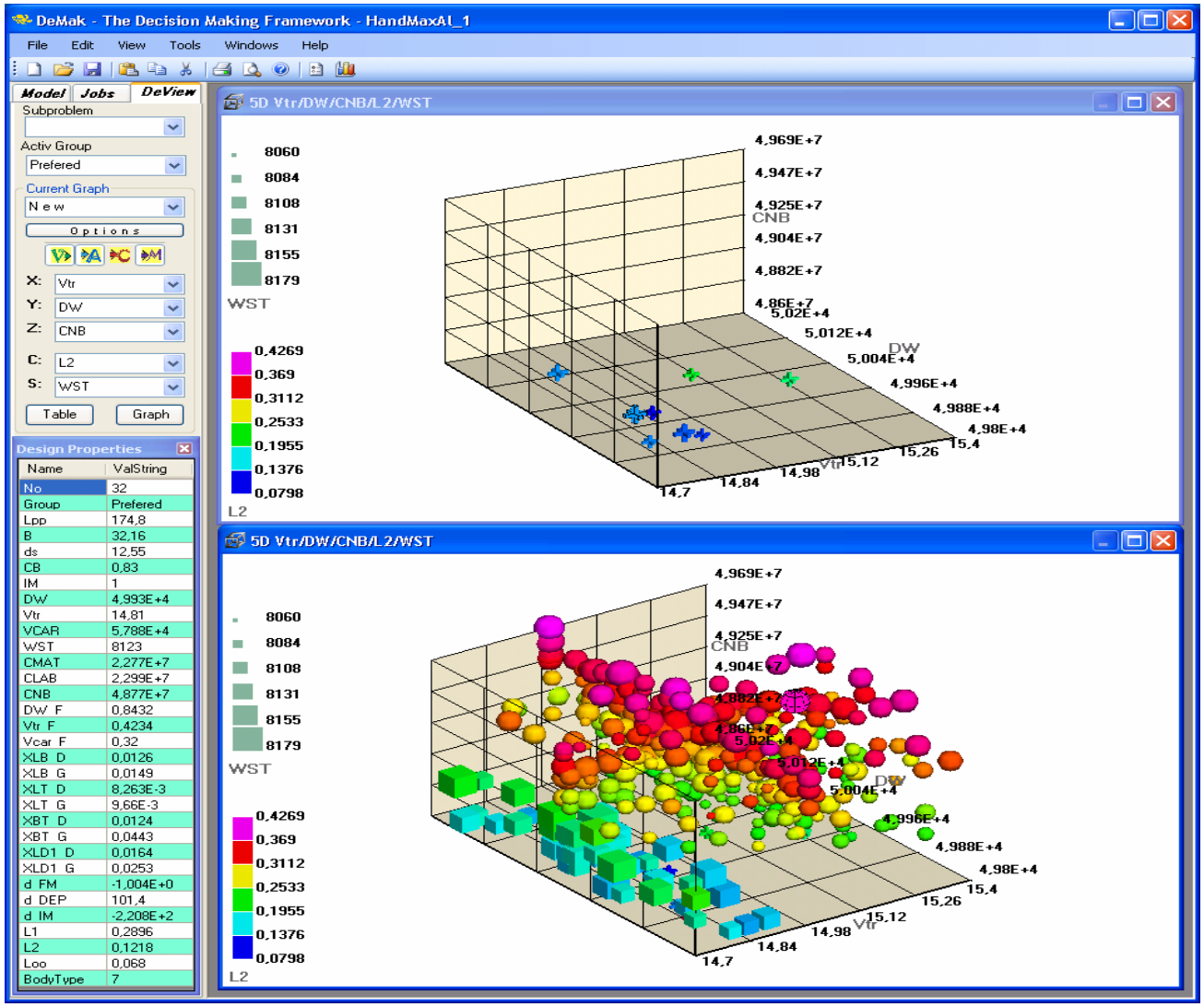
Na donjem dijelu naredne slike su prikazani optimalni nedominirani projekti u trodimenzionalnom koordinatnom sustavu s brzinom broda v_{tr}, korisnom nosivošću DW i cijenom novogradnje C_{NB} na pojedinim koordinatama. Oblikom oznake pojedinog projekta (kocka ili kugla) je označen pripadni porivni stroj (projekti označeni kockom imaju porivni stroj 6S50MC-C, a kuglom 7S50MC-C). Veličina kocke, odnosno kugle predstavlja masu čelične konstrukcije W_{st} (manja masa je predstavljena manjom kockom, odnosno kuglom). Time smo definirali petodimenzijski prostor projektnih ciljeva. Spektrom boja je prikazana udaljenost od utopije.

Na gornjem dijelu slike su prikazani samo oni projekti koji su preferirani po nekom kriteriju - u ovom slučaju šest projekata koji su po odabranoj metrici najbliži utopiji i dva najbolja projekta sa snažnijim (skupljim) porivnim strojem. Oni su označeni trodimenzionalnim križićima.

Na lijevoj strani slike su prikazani podaci jednog selektiranog projekta.

Iz slike je uočljivo da su nedominirani projekti podijeljeni u dvije velike skupine i to prema odabranom porivnom stroju. Iz toga se može izvući zaključak da, i u ovom slučaju, razlika cijena porivnih strojeva dominantno utječe na cijenu novogradnje, odnosno da su svi ostali elementi koji sudjeluju u cijeni novogradnje nižeg značaja.

Obzirom da je cijena izgradnje broda atribut koji je preferiran u odnosu na ostale projektne atribute, njen je utjecaj na određivanje udaljenosti od idealnog projekta ("utopije") dominantan, pa su projekti s najnižom cijenom ujedno i najbliži idealu, odnosno, na slici su obojani plavim bojama.

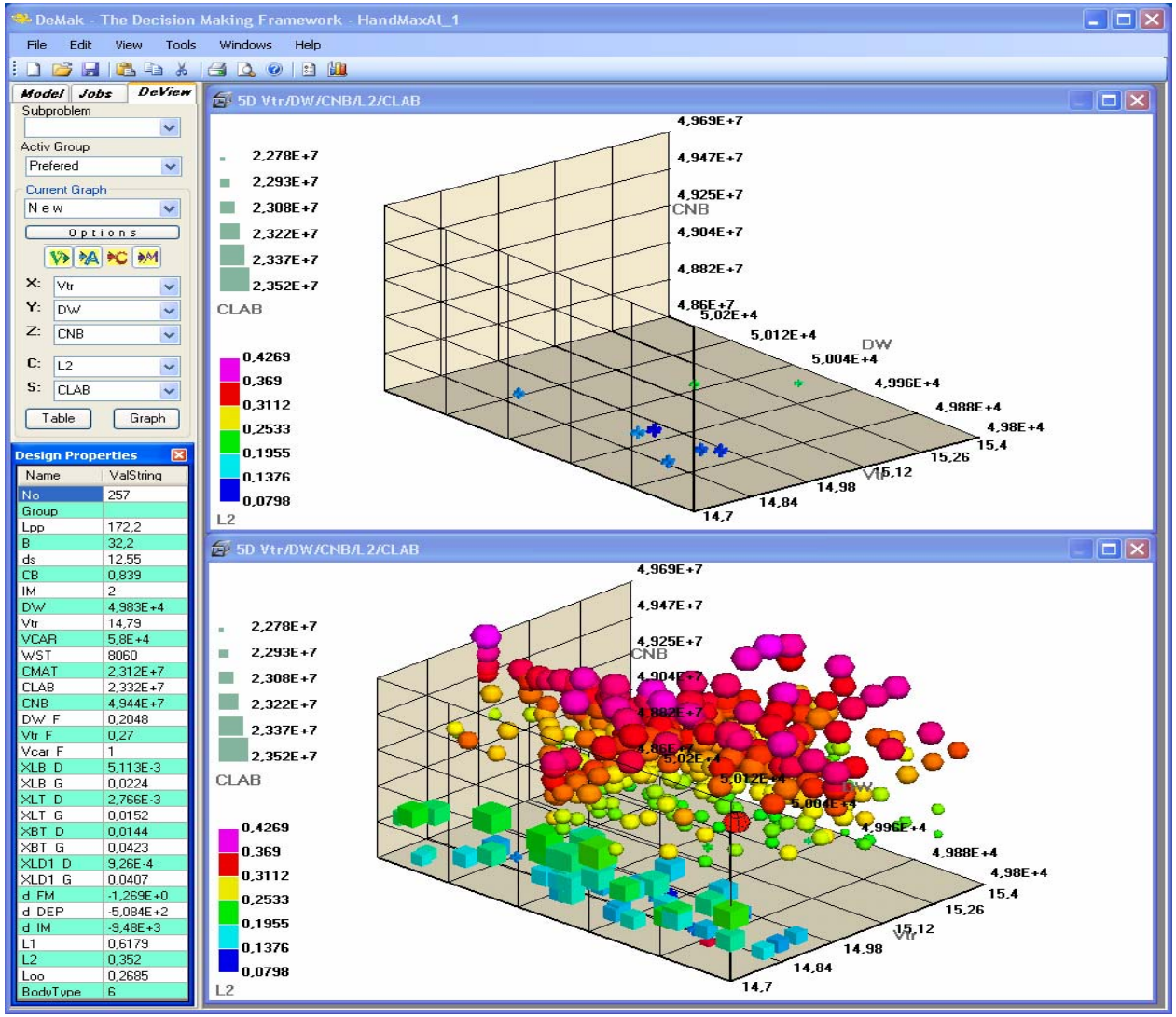


Slika br. 29.

Optimalni nedominirani projekti

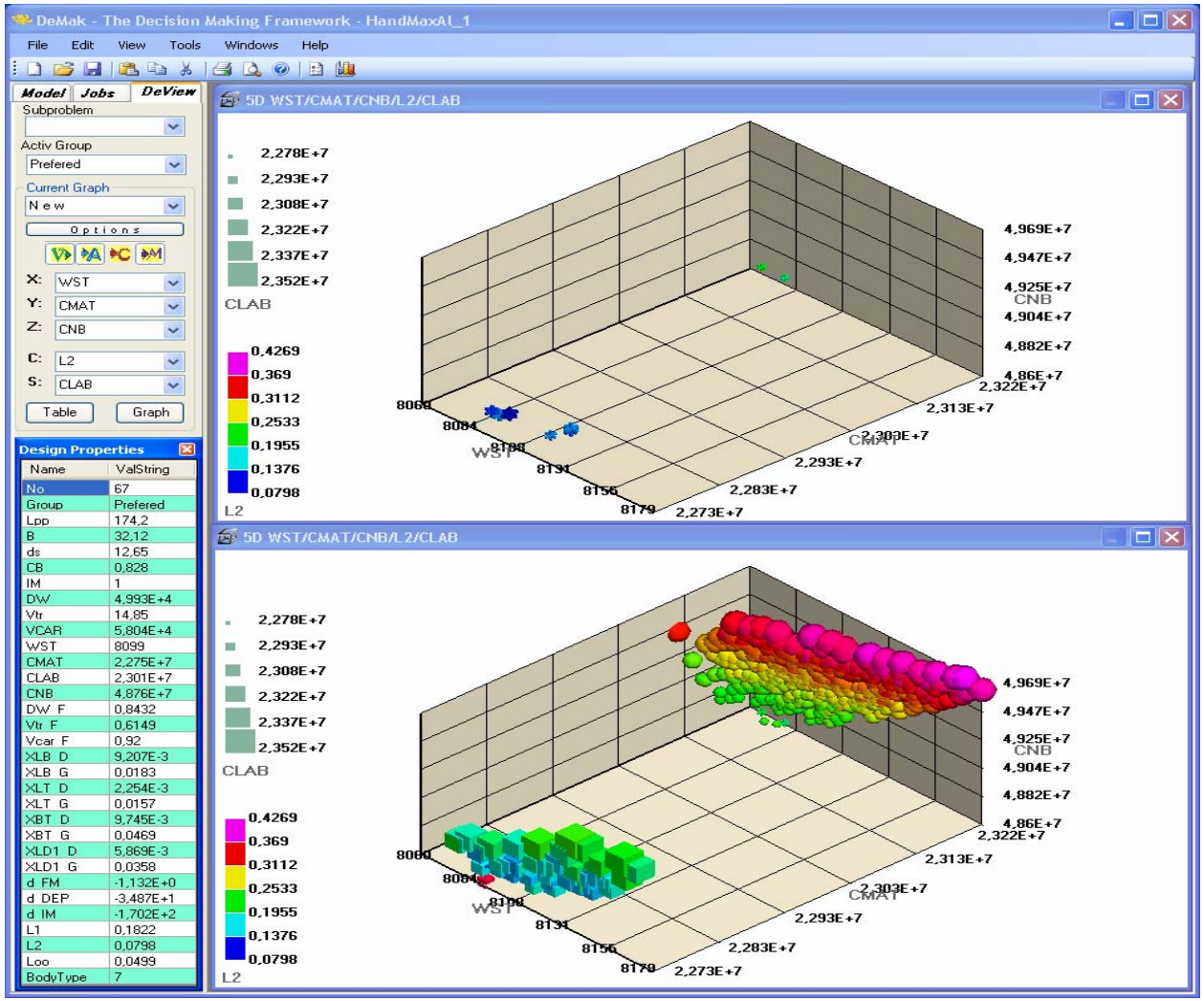
Sljedećim dvjema slikama su prikazani optimalni nedominirani projekti u koordinatnim sustavima: brzina na pokusnoj plovidbi v_{tr}, korisna nosivost DW i cijena novogradnje C_{NB}, odnosno masa čelične konstrukcije W_{st}, korisna nosivost DW i cijena novogradnje C_{NB}. Na obim slikama cijena rada C_L je predstavljena veličinom oznake, a udaljenost od utopije bojom. U donjem dijelu slike su svi nedominirani projekti, a u gornjem samo preferirani.

Slično prethodnom primjeru, iz slika se može također uočiti podjela projekata u dvije velike skupine prema odabranom porivnom stroju. Za obje slike je karakteristično da su modrom, plavom i zelenom bojom označeni projekti s manjim porivnim strojem (bliži su idealnom rješenju). Može se uočiti da je veličina kugle, odnosno kocke (cijena rada) prilično ravnomjerno raspoređena, što vodi zaključku da je, u ovom slučaju, utjecaj cijene materijala značajniji od cijene rada (procesa). To je bilo za očekivati, jer je ponovno razlika u cijeni porivnih strojeva dominantna u odnosu na ostale utjecajne faktore.



Slika br. 30.

Optimalni nedominirani projekti



Slika br. 31.

Optimalni nedominirani projekti

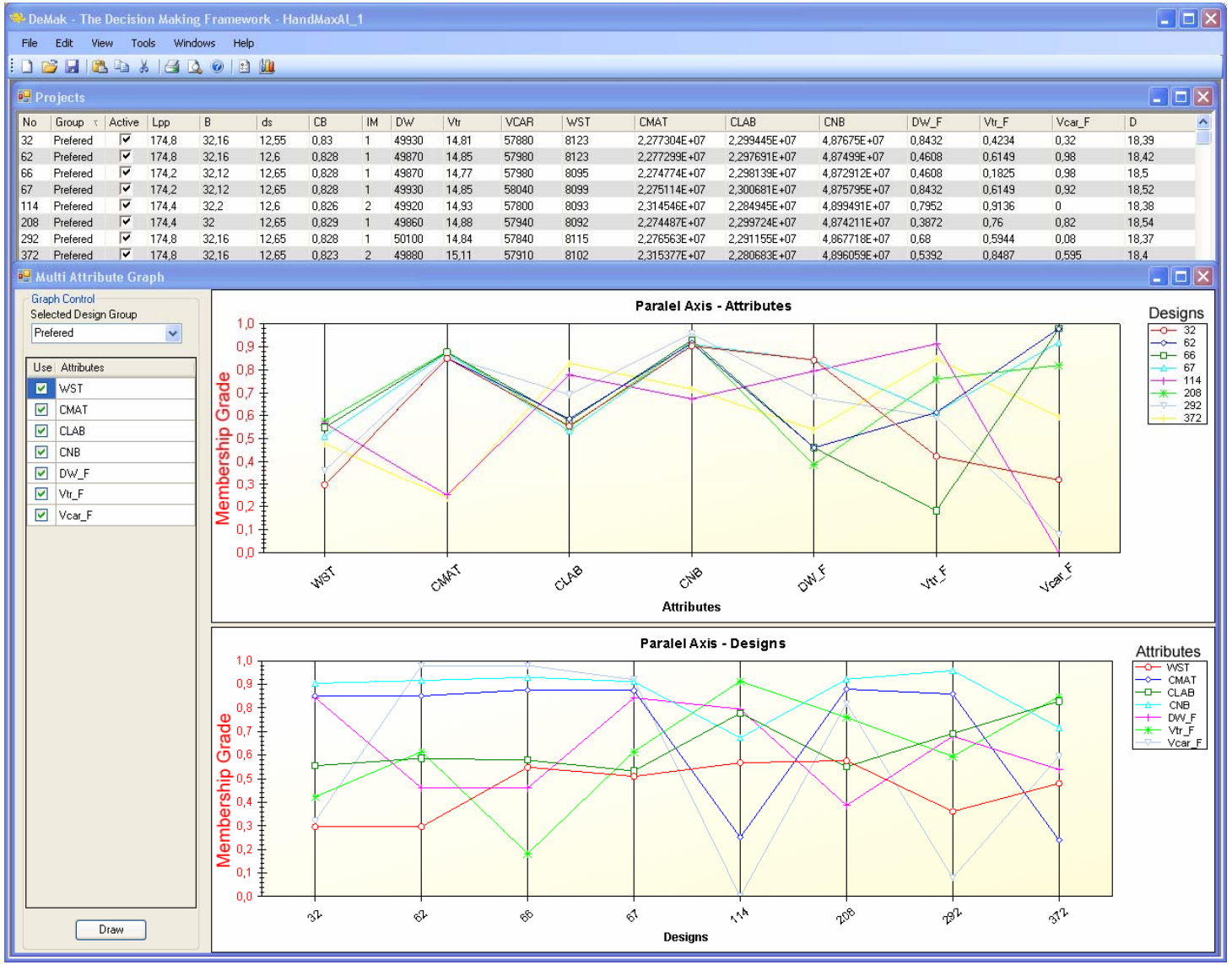
Sljedećom slikom je prikazan subjektivni prostor projektnih atributa. U donjem dijelu slike je prikazano preferiranih osam projekata u odnosu na subjektivnu kvalitetu ispunjavanja pojedinih projektnih atributa. Od preferiranih osam projekata šest ih je selektirano prema minimalnoj udaljenosti od utopije, a preostala dva su najbolja od projekata s većim porivnim strojem. Na jednom su dijagramu projekti prikazani različitim bojama, a atributi su poredani na apscisi, dok su na drugom dijagramu uloge zamijenjene.

U gornjem dijelu slike je prikazana tablica alfanumeričkih podataka svih preferiranih projekata.

Može se ponoviti komentar iz prethodnog primjera: cijena porivnog stroja dominira u ukupnoj cijeni materijala, dok su razlike u cijeni rada (procesa) manjeg opsega.

Kod eventualnog izbora projekta koji ispunjava pojedine projektne atribute (pogotovo one čije je ispunjavanje ujedno i ugovorna obveza - korisna nosivost DW, brzina v_{tr} i volumen teretnih skladišta V_{car}) na pripadajućim donjim granicama subjektivnog zadovoljenja, treba u daljnjoj fazi projektiranja "ugroženim" atributima posvetiti adekvatnu pažnju.

I u ovom primjeru prikazane slike pružaju projektantu informacije nužne za konačni izbor jednog od nedominiranih, odnosno subjektivno preferiranih projekata.



Slika br. 32.

Subjektivno odlučivanje putem paralelnih osi

Ponovno izaberimo projekt s najnižom cijenom gradnje kao subjektivno preferirani, što je sa strane brodogradilišta poželjno projektno rješenje. Prethodnom slikom je prikazan kao odabir projekt br. 292: na gornjem dijagramu je prikazan svjetloplavom crtom s trokutićima i ima najveći iznos na ordinati cijene novogradnje, a na donjem je dijagramu cijena novogradnje označena tamnoplavom crtom s trokutićima najviša na ordinati projekta br. 292. Osnovne karakteristike projekta su sljedeće:

L_{pp} = 174.8 m
B = 32.16 m
d_s = 12.65 m
D = 18.37 m
C_B = 0.828
DW = 50100 t
v_{tr} = 14.84 čv
V_{car} = 57840 m^3
W_{st} = 8115 t
Porivni stroj MAN B&W 6S50MC-C
C_M = 22.766 MUSD
C_L = 22.912 MUSD
C_{NB} = 48.677 MUSD

Obzirom na projektni zahtjev može se uočiti da preferirani projekt diskretno podbacuje u ispunjavanju zahtijevanog volumena teretnih skladišta i zahtijevane brzine. Preferirani projekt vrlo dobro udovoljava zahtjevima postavljenim projektnim zadatkom, pa u daljnjoj fazi razrade projekta nema kritičnih točaka kojima treba obratiti dodatnu pozornost.

U odnosu na suvremene projekte Handymax product tankera prikazane tablicom br. 8 može se komentirati da je preferirani projekt superioran po postignutoj korisnoj nosivosti i volumenu teretnih tankova. Projekt je očekivano dosegao maksimalnu duljinu i gaz, što je vodilo manjoj snazi porivnog stroja, a time i cijeni novogradnje kao dominantnom kriteriju.

10. ZAKLJUČAK

Projektna procedura i matematički modeli osnivanja trgovačkih brodova pune forme koji su izloženi u ovom radu su bazirani na nizu uspješnih projekata i novogradnji izgrađenih u brodogradilištu Brodosplit tijekom posljednjih petnaestak godina.

Objavljena procedura je univerzalno primjenjiva kod osnivanja brodova za prijevoz sipkih tereta, tankera i ostalih tipova brodova sa srodnim osnovnim svojstvima. Prednost iznesenog projektnog postupka pred tradicionalnim postupcima (npr. projektiranje prema tzv. "projektnoj spirali") je u njenoj mogućnosti primjene i prilagodbe u različitim metodama provedbe projektnog postupka.

Slijedeći projektnu proceduru grafički prikazanu slikom br. 6, postupak osnivanja broda je moguće provesti najjednostavnijim alatima i izraditi projekt koji ispunjava sve osnovne projektne zahtjeve i ograničenja. Naravno, kvaliteta takvog projekta ne možemo smatrati optimalnim, niti imati predodžbu o njegovoj udaljenosti od nekakvog ideala.

Primijenjena metoda optimiranja ("višeatributna sinteza projekta") uz aplikaciju prilagođene projektne procedure i pripadnih matematičkih modela rezultirala je kvalitetnim skokom iz područja tradicionalnog osnivanja broda u vrhunac suvremenog pristupa predmetnoj problematici. Razvijeni program se može koristiti za projektiranje širokog spektra brodova u našim brodogradilištima i razvojnim institucijama. Prilagodba matematičkih modela osnivanja broda je vrlo jednostavna, pa je moguće ugrađivati subjektivno projektantsko iskustvo iz bilo kojeg brodogradilišta u skladu sa specifičnostima pojedinog brodogradilišta i osobnim iskustvom i stavovima pojedinog projektanta.

Razvijeni program je opremljen kvalitetnom izlaznom grafikom koja pruža projektantu dosad neslućene mogućnosti za analizu i sintezu projekta. Omogućeno je da se projektant (ili projektni tim) usredotoči na vlastitu subjektivnu procjenu važnosti pojedinih projektnih atributa, analizu njihovih međusobnih odnosa i sintezu projekta, odnosno, izvlačenje pojedinih zakonitosti iz provedenog projektnog postupka.

Prilikom konačnog izbora projektnog rješenja projektantu stoji na raspolaganju čitav niz informacija i mogućnosti koje omogućavaju dobivanje potpune slike projekta: kvalitete zadovoljenja uvjeta svakog pojedinog atributa, njihov relativni odnos prema istim atributima u drugim projektnim rješenjima i informacije o tome na što se u daljnjoj fazi razrade projekta treba obratiti posebna pažnja.

Također je moguće izvršiti konačan izbor projekta u suradnji s brodovlasnikom - na raspolaganju su svi tehnički i komercijalni podaci za sve nedominirane projekte. Konačno, prikazani postupak i metoda daju osnovu za daljnju afirmaciju naše brodogradnje i uspješnije poslovanje brodogradilišta.

Daljnji razvoj primijenjene projektne procedure je moguće voditi dvama paralelnim smjerovima: širenjem baza podataka matematičkih modela osnivanja pojedinih tipova i veličina brodova, te proširenjem matematičkih modela još i na razdoblje eksploatacije broda. Prvi navedeni razvojni pravac ide u smjeru pripreme za postepeno prebacivanje naših brodogradilišta na gradnju složenijih brodova. Druga linija vodi istraživanju područja koje još nije dovoljno pokriveno u svjetskoj brodograđevnoj i pomorskoj praksi - optimiranju projekta broda ne samo sa strane brodogradilišta ili sa strane budućeg vlasnika, nego i optimiranju s obzirom na cijeli vijek broda - od ugovaranja i gradnje, preko eksploatacije, pa do konačne prodaje ili rashodovanja broda.

LITERATURA

[1] International Maritime Organization (IMO), International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), Consolidated Edition, London 2004.

[2] International Maritime Organization (IMO), International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL) 73/78, Consolidated Edition, London 2002.

[3] International Maritime Organization (IMO), International Convention on Load Lines (ICLL), 1966, sa amandmanima.

[4] Saint Lawrence Seaway Development Corporation, Department of Transportation: Seaway regulations and rules, Edition 2004.

[5] Autoridad del Canal de Panama, MR Notice to Shipping No. N-1-2003, Vessel Requirements, 2003.

[6] Suez Canal Authority, Rules of Navigation, Circular No 2/2001, 2001.

[7] ČUDINA P.: Primjena višekriterijskog optimiranja prilikom osnivanja broda u B. I. Split, Zbornik radova XI simpozija "Teorija i praksa brodogradnje", Dubrovnik 1994.

[8] ČUDINA P.: Osnivanje suezmax tankera nove generacije, Zbornik radova XII simpozija "Teorija i praksa brodogradnje", Zagreb 1996.

[9] ČUDINA P.: Research & Development Supercargo Project (I), Brodogradnja 48(2000)4, 338-342.

[10] ČUDINA P.: Research & Development Supercargo Project (II), Brodogradnja 49(2001)1, 55-60.

[11] ČUDINA P.: Research & Development Supercargo Project (III), Brodogradnja 49(2001)3, 300-306.

[12] ČUDINA P.: Research & Development Supercargo Project (IV), Brodogradnja 49(2001)4, 409-413.

[13] BELAMARIĆ I, ČUDINA P, ŽIHA K.: Design Analysis of a New Generation of Suezmax Tankers, Journal of Ship Production 15(1999), 53-64.

[14] WATSON D.G.M, GILFILLAN A.W.: Some Ship Design Methods, The Naval Architect 4(1977)6, 279-324.

[15] BELAMARIĆ I, ŽIHA K, ČUDINA P.: Multikriterijalna optimizacija suezmax tankera 150000 dwt, Zbornik radova X simpozija "Teorija i praksa brodogradnje", Rijeka 1992.

[16] MAGAZINOVIĆ G.: Program za regresiju općeg oblika primjenom postupka optimiranja, Projekt 85N11708, Brodograđevna industrija "Split", Split 1988.

[17] International Maritime Organization (IMO), International Convention on the Tonnage Measurement of Ships, London 1969.

[18] ŽANIĆ V, GRUBIŠIĆ I, TRINCAS G.: Multiattribute Decision Making System Based on Random Generation of Nondominated Solutions: an Application to Fishing Vessel Design, Proceedings of PRADS 92.

[19] TRINCAS G, ŽANIĆ V, GRUBIŠIĆ I.: Comprehensive Concept of Fast Ro-Ro Ships by Multiattribute Decision-Making, Proceedings of 5th International Marine Design Conference, IMDC'94, Delft, 1994.

[20] GRUBIŠIĆ I, ŽANIĆ V, TRINCAS G.: Sensitivity of Multiattribute Design to Economy Enviroment: Shortsea Ro-Ro Vessels, Proceedings of VI International Marine Design Conference, Vol 1, Newcastle, 1997, 201-216, Vol 3, Discussions and Replies, 89, 92 (1998), Penshaw Press..

[21] ŽANIĆ V.: Decision Support Techniques in Structural and General Ship Design, Proceedings of the International Congress of Marine Research and Transportation - ICMRT 2005 / Cassella, Pasquale; Cioffi Pasquale (ur.), Napulj, Italija, 2005, 1-14 (invited lecture, međunarodna recenzija, znanstveni rad).

[22] ŽANIĆ V, ŽIHA K.: Sensitivity to Correlation in Multivariate Models, Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences 5(1998), 75-84, Polska Akademia Nauk, Varšava.

[23] ŽANIĆ V, ANDRIĆ J, FRANK D.: Structural Optimisation Method for the Concept Design of Ship Structures // Proceedings of the 8th International Marine Design Conference / Papanikoalu, A.D. (ur.), Atena: National Technical University of Athens, 2003, 205-217 (međunarodna recenzija, znanstveni rad).

[24] ŽANIĆ V, ANDRIĆ J, PREBEG P.: Superstructure Deck Effectiveness of the Generic Ship Types - A Concept Design Methodology // Proceedings of the 11th International Congress of International Maritime Association of the Mediterranean (IMAM 2005), Lisabon, 2005, 579-588 (međunarodna recenzija, znanstveni rad).

[25] WATSON D.G.M.: Practical Ship Design, Elsevier Science Ltd, Oxford 1998.

[26] BOSNIĆ A.: Osnivanje broda, Sveučilišna naklada Liber, Zagreb 1981.

[27] NOVAK V.: Fuzzy Sets and their Applications, Adam Hilger, Bristol 1989.

KRATKI ŽIVOTOPIS

Predrag Čudina je rođen 04.07.1956. godine u Splitu. Osnovnu školu i klasičnu gimnaziju pohađao je u Splitu. Diplomirao je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu 1982. godine i stekao zvanje diplomiranog inženjera brodogradnje.

Odmah po završetku studija zaposlio se u Brodogradilištu "Split" gdje na raznim poslovima radi neprekinuto do danas. Od 1993. do 2002. je radio na mjestu glavnog projektanta broda i rukovoditelja projektnog odjela. Od 2002. do 2005 je obavljao dužnost predsjednika uprave Brodosplita, d.d. i direktora Brodosplit-brodogradilišta, d.o.o. Trenutno je zaposlen na radnom mjestu glavnog projektanta broda.

Izradio je preko 200 projekata različitih tipova brodova (tankeri 2.000 - 170.000 dwt; bulk carrier-i 5.000 - 200.000 dwt; brodovi za opće terete 5.000 - 22.000 dwt; brodovi za rashlađene terete 300.000 - 600.000 cu.ft; brodovi za prijevoz container-a 1.000 - 4.000 TEU; RO-PAX-evi, feriboti, luksuzna jahta). Prema njegovim je projektima u Brodogradilištu "Split" izgrađeno preko trideset novogradnji.

Član je Tehničkog komiteta Lloyd's Register of Shipping i Upravnog vijeća Hrvatskog registra brodova. Autor je desetak stručnih i znanstvenih članaka. Oženjen je i otac troje djece.