# Nova metodologija projektiranja trgovačkih brodova

**Čudina, Predrag**

**Doctoral thesis / Disertacija**

**2010**

*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:235:635459

*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

# NOVA METODOLOGIJA PROJEKTIRANJA TRGOVAČKIH BRODOVA

DOKTORSKI RAD

Predrag Čudina

ZAGREB, 2010.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# NOVA METODOLOGIJA PROJEKTIRANJA TRGOVAČKIH BRODOVA

DOKTORSKI RAD

Mentor:

Prof.dr.sc. Vedran Žanić

mr.sc. Predrag Čudina

ZAGREB, 2010.

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU

| | |
|---|---|
| UDK: | 629.5.01:519.8 |
| Ključne riječi: | Osnivanje broda, optimizacija, trgovački brod, robustnost projekta |
| Znanstveno područje: | Tehničke znanosti |
| Znanstveno polje: | Brodogradnja |
| Institucija u kojoj je izrađen: | Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb |
| Mentor rada: | Dr. sc. Vedran Žanić, redoviti profesor |
| Broj stranica: | |
| Broj slika: | 73 |
| Broj tablica: | 53 |
| Broj korištenih bibliografskih jedinica: | 55 |
| Datum obrane: | 1. listopada 2010. |
| Povjerenstvo: | Dr. sc. Izvor Grubišić, red. prof. - predsjednik<br>Dr. sc. Vedran Žanić, red. prof. - mentor<br>Dr. sc. Igor Belamarić, u mirovini – član |
| Institucija u kojoj je rad pohranjen: | Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb |

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., Petru Prebegu, dipl.ing. i Karlu Piriću, dipl.ing. na vrijednoj i nesebičnoj pomoći pri izradi rada.

Posebno se zahvaljujem Željku Đigašu, dipl.ing. na pomoći prilikom izrade analize propulzijskih sustava.

SADRŽAJ

PREDGOVOR ..... 1

SAŽETAK ..... 3

SUMMARY ..... 4

KLJUČNE RIJEČI ..... 5

POPIS OZNAKA I KRATICA ..... 6

POPIS SLIKA ..... 10

POPIS TABLICA ..... 14

1 UVOD ..... 17

2 HIPOTEZA I ORGANIZACIJA RADA ..... 22

3 OSNOVNA SVOJSTVA PROJEKATA SUVREMENIH TRGOVAČKIH BRODOVA ..... 25

4 OSNOVE NOVE METODOLOGIJE PROJEKTIRANJA TRGOVAČKIH BRODOVA ..... 28

5 OSNOVE EKONOMSKE EKSPLOATACIJE TRGOVAČKOG BRODA ..... 34
5.1 Kretanje cijena novogradnji ..... 34
5.2 Kretanje pomorskog tržišta i ostvarivanje prihoda ..... 34
5.3 Troškovi eksploatacije broda i financiranja ..... 38
5.4 Kretanje cijena polovnog brodovlja i otpadnog čelika ..... 39

6 UTJECAJ VANJSKIH PARAMETARA NA PROJEKT I EKSPLOATACIJU TRGOVAČKOG BRODA ..... 42
6.1 Fluktuacija US$ ..... 42
6.2 Cijena brodograđevnog čelika ..... 43
6.3 Cijena pogonskog goriva ..... 45

7 OPĆA PROJEKTNA PROCEDURA OSNIVANJA TRGOVAČKOG BRODA ..... 47
7.1 Opća projektna procedura ..... 47
7.1.1 Definicija projektnog zadatka ..... 49
7.1.2 Variranje projektnih varijabli i provjera ograničenja ..... 52
7.1.3 Proračun visine broda i provjera minimalnog nadvođa ..... 52
7.1.4 Proračun minimalne snage porivnog stroja ..... 52
7.1.5 Proračun istisnine, vlastite mase i ukupne nosivosti ..... 52
7.1.6 Proračun cijene novogradnje ..... 52
7.2 Specifičnosti osnivanja pojedinih tipova brodova ..... 53

8 MATEMATIČKI MODUL OSNIVANJA TRGOVAČKOG BRODA ..... 55
8.1 Definicija projektnog zadatka ..... 55
8.1.1 Projektne varijable $\boldsymbol{x}_{dsgn} = \{L_{pp}, B, d_s, C_B, V_{car}, v_{tr}, l_{me}\}$ ..... 55
8.1.2 Projektni parametri $\boldsymbol{d}_{dsgn} = \{\boldsymbol{d}_{req}, \boldsymbol{d}_{calc}, \boldsymbol{d}_{cost}\}$ ..... 55
8.1.3 Projektna ograničenja $\boldsymbol{g}_{dsgn} = \{\boldsymbol{g}_{min\text{-}max}, \boldsymbol{g}_{ratios}\}$ ..... 57
8.1.4 Zavisna projektna svojstva (atributi) $\boldsymbol{y}_{dsgn}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{d}) = \{\boldsymbol{y}_{ach}, \boldsymbol{y}_{yard}\}$ ..... 58
8.1.5 Projektni ciljevi $\boldsymbol{o}_{dsgn}$ ..... 59
8.2 Variranje projektnih varijabli i provjera ograničenja ..... 60
8.3 Proračun visine broda i provjera minimalnog nadvođa ..... 61
8.4 Proračun minimalne snage porivnog stroja ..... 61
8.5 Selektiranje maksimalne snage porivnog stroja ..... 62
8.6 Proračun istisnine, vlastite mase i ukupne nosivosti ..... 65
8.7 Proračun cijene novogradnje ..... 66
8.7.1 Proračun cijene materijala ..... 67
8.7.2 Proračun cijene rada (procesa) ..... 67
8.7.3 Proračun preostalih troškova ..... 69

9 EKONOMSKI MODEL EKSPLOATACIJE TRGOVAČKOG BRODA ..... 70
9.1 Investicijski trošak ..... 70
9.2 Prihodi od eksploatacije broda ..... 71
9.3 Troškovi eksploatacije broda i financiranja poslovanja ..... 73
9.4 Vrijednost broda nakon perioda eksploatacije ..... 74
9.5 Rezultat poslovanja broda ..... 76

10 MATEMATIČKI MODUL EKSPLOATACIJE TRGOVAČKOG BRODA ..... 77
10.1 Investicijski trošak (cijena novogradnje) ..... 77
10.2 Prihodi od eksploatacije broda ..... 77
10.3 Troškovi eksploatacije broda i financiranja poslovanja ..... 77
10.4 Vrijednost broda nakon perioda eksploatacije ..... 81
10.5 Rezultat poslovanja broda ..... 82
10.6 Projektni parametri $\boldsymbol{d}_{exp}$, atributi $\boldsymbol{y}_{exp}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{d})$ i ciljevi $\boldsymbol{o}_{exp}$ ..... 83

11 NOVA PROJEKTNA PROCEDURA OSNIVANJA TRGOVAČKOG BRODA ..... 85
11.1 Definiranje novog projektnog prostora ..... 85
11.2 Identifikacija projektnih varijabli $\boldsymbol{x} = \boldsymbol{x}_{dsgn}$ ..... 89
11.3 Identifikacija projektnih parametara $\boldsymbol{d} = \{\boldsymbol{d}_{dsgn}, \boldsymbol{d}_{exp}\}$ ..... 89
11.4 Identifikacija projektnih ograničenja $\boldsymbol{g} = \boldsymbol{g}_{dsgn}$ ..... 90
11.5 Identifikacija projektnih atributa $\boldsymbol{y}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{d}) = \{\boldsymbol{y}_{dsgn}, \boldsymbol{y}_{exp}\}$ ..... 91
11.6 Identifikacija projektnih ciljeva $\boldsymbol{o} = \{\boldsymbol{o}_{dsgn}, \boldsymbol{o}_{exp}\}$ ..... 91

12 METODA OPTIMIRANJA U OSNIVANJU TRGOVAČKOG BRODA ..... 92
12.1 Opis matematičkog modela postupka donošenja odluke ..... 93
12.2 Tehnike subjektivnog donošenja odluke ..... 97
12.2.1 Određivanje preferencija unutar pojedinog atributa ..... 97
12.2.2 Određivanje preferencija među pojedinim atributima ..... 99
12.3 Manipuliranje projektnim problemom i strategije rješavanja ..... 101

12.3.1 Strategija rješavanja MADM pristupom ..... 102
12.4 Generalna projektna procedura i interakcija s projektantom i projektnom okolinom ..... 104
12.5 Zadavanje preferencija kod primjene metode višeatributne sinteze projekta u optimiranju projekta broda ..... 107
12.5.1 Zadavanje preferencija unutar pojedinog atributa projekta broda ..... 108
12.5.2 Zadavanje preferencija među pojedinog atributa projekta broda ..... 109

13 UTJECAJ VANJSKIH PARAMETARA NA PROJEKT TRGOVAČKOG BRODA (ROBUSTNOST PROJEKTA) ..... 110
13.1 Osnove analize robustnosti ..... 110
13.2 Kratki opis programske aplikacije ..... 112
13.3 Planiranje pokusa ..... 115
13.3.1 Osnove planiranja pokusa ..... 115
13.3.2 Izbor prikladnih ortogonalnih polja ..... 118
13.3.3 Pregled svojstava ortogonalnih polja ..... 121
13.4 Proračun robustnosti ..... 122
13.4.1 Taguchi-eva mjera robustnosti ..... 122
13.4.2 Provedba pokusa ..... 125
13.5 Primjena analize robustnosti kod projekta trgovačkog broda ..... 126

14 OSNIVANJE AFRAMAX TANKERA NOVOM METODOLOGIJOM ..... 128
14.1 Pregled suvremenih Aframax tankera ..... 128
14.2 Projektni zahtjev ..... 129
14.3 Definiranje projektnog prostora ..... 129
14.4 Identifikacija projektnog zadatka ..... 132
14.4.1 Projektne varijable $\boldsymbol{x} = \boldsymbol{x}_{dsgn}$ ..... 132
14.4.2 Projektni parametri $\boldsymbol{d} = \{\boldsymbol{d}_{dsgn}, \boldsymbol{d}_{exp}\}$ ..... 132
14.4.3 Projektna ograničenja $\boldsymbol{g} = \boldsymbol{g}_{dsgn}$ ..... 134
14.4.4 Projektni atributi $\boldsymbol{y}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{d}) = \{\boldsymbol{y}_{dsgn}, \boldsymbol{y}_{exp}\}$ ..... 135
14.4.5 Projektni ciljevi $\boldsymbol{o} = \{\boldsymbol{o}_{dsgn}, \boldsymbol{o}_{exp}\}$ ..... 139
14.5 Variranje projektnih varijabli ..... 140
14.6 Približni proračun minimalnog nadvođa ..... 140
14.7 Proračun minimalne snage porivnog stroja ..... 140
14.8 Proračun mase čelične konstrukcije, mase strojo opreme i mase ostale brodske opreme ..... 142
14.9 Proračun ukupnog zatvorenog volumena broda ..... 143
14.10 Prikaz i diskusija rezultata ..... 143
14.11 Analiza robustnosti nedominiranih projekata Aframax tankera ..... 160

15 OSNIVANJE HANDYMAX BULK CARRIER-A NOVOM METODOLOGIJOM ..... 169
15.1 Pregled suvremenih Handymax bulk carrier-a ..... 169
15.2 Projektni zahtjev ..... 169
15.3 Definiranje projektnog prostora ..... 170
15.4 Identifikacija projektnog zadatka ..... 173
15.4.1 Projektne varijable $\boldsymbol{x} = \boldsymbol{x}_{dsgn}$ ..... 173

15.4.2 Projektni parametri $\boldsymbol{d} = \{\boldsymbol{d}_{dsgn}, \boldsymbol{d}_{exp}\}$ ..... 173
15.4.3 Projektna ograničenja $\boldsymbol{g} = \boldsymbol{g}_{dsgn}$ ..... 175
15.4.4 Projektni atributi $\boldsymbol{y}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{d}) = \{\boldsymbol{y}_{dsgn}, \boldsymbol{y}_{exp}\}$ ..... 175
15.4.5 Projektni ciljevi $\boldsymbol{o} = \{\boldsymbol{o}_{dsgn}, \boldsymbol{o}_{exp}\}$ ..... 179
15.5 Variranje projektnih varijabli ..... 179
15.6 Približni proračun minimalnog nadvođa ..... 179
15.7 Proračun minimalne snage porivnog stroja ..... 180
15.8 Proračun mase čelične konstrukcije, mase strojo opreme i mase ostale brodske opreme ..... 181
15.9 Proračun ukupnog zatvorenog volumena broda ..... 182
15.10 Prikaz i diskusija rezultata ..... 183
15.11 Analiza robustnosti nedominiranih projekata Handymax bulk carrier-a ..... 200

16 ZAKLJUČAK ..... 209

LITERATURA ..... 211

STRUČNI IZVJEŠTAJI I DOKUMENTI ..... 215

KRATKI ŽIVOTOPIS ..... 216

CURRICULUM VITAE ..... 217

PRILOG 1: PRIBLIŽNI PRORAČUN MINIMALNOG NADVOĐA AFRAMAX TANKERA ..... 218

PRILOG 2: REZULTAT POSTUPKA APROKSIMACIJE SNAGE PORIVNOG STROJA AFRAMAX TANKERA (IZLAZNA LISTA PROGRAMA POWERRA V1.0) ..... 220

PRILOG 3: PRIBLIŽNI PRORAČUN MINIMALNOG NADVOĐA HANDYMAX BULK CARRIER-A ..... 226

PRILOG 4: REZULTAT POSTUPKA APROKSIMACIJE SNAGE PORIVNOG STROJA HANDYMAX BULK CARRIER-A (IZLAZNA LISTA PROGRAMA POWERRA V1.0) ..... 228

# PREDGOVOR

Posljednjih smo godina svjedoci jedinstvenih kretanja pomorskog i brodograđevnog tržišta. Do prije nekoliko godina potražnja za brodskim prostorom je bila u stalnom rastu, pa su posljedično i cijene vozarina dosegle neslućene visine te se na toj razini dugo održavale. Iako su se u ovom periodu cijene novogradnji višestruko povećale, to nije dovelo do bitno kvalitetnijih uvjeta poslovanja brodogradilišta, prvenstveno zbog istovremenog izuzetnog porasta nabavne cijene čelika, sirovina te materijala i opreme koja se ugrađuje u brod.

Nakon toga je nastupio period gospodarske recesije i strmoglavog pada pomorskog i brodograđevnog tržišta. Brodogradilišta su se našla u izuzetno teškoj situaciji s velikim brojem raskinutih ugovora za gradnju broda i bez novih narudžbi.

Dodatne poteškoće brodogradilištima je uzrokovalo dugogodišnje padanje vrijednosti US$ u odnosu na ostale dominantne valute, čime je položaj brodogradilišta doveden do apsurdne situacije: iako su cijene novogradnji tijekom dugog perioda bile izuzetno visoke rezultati poslovanja su bili loši. Brodogradilišta su se pokušala zaštititi od negativnih posljedica uključivanjem u brodograđevne ugovore tzv. „klizne skale za čelik“ i ugovaranjem cijene novogradnji u „košari valuta“, a ne samo u US$, kako je u dugogodišnjoj praksi bilo uvriježeno.

Sva ta nastojanja brodogradilišta, nažalost, nisu rezultirala izbjegavanjem negativnih rezultata poslovanja, već samo njihovim ublažavanjem. Uzrok tome leži u činjenici da su svi potezi povlačeni nakon odigravanja negativnih događaja, te da se pomorsko i brodograđevno tržište nije ponašalo po ustaljenom obrascu. Tržište po prvi put nije osciliralo po uobičajenoj sinusoidalnoj karakteristici sa periodom od nekoliko godina i odnosom maksimalnih i minimalnih cijena novogradnji od oko 1.5–2 naprama 1. Perioda sinusoide se jako produljila, a cijene brodova su dosegle nezabilježene visine.

Glavni uzrok tome je bio u snažnom otvaranju ogromnog kineskog tržišta. Investicije u razvoj infrastrukture i gospodarstva uzrokovale su enormnu potrebu za uvozom repromaterijala, prvenstveno čelika. To je imalo za posljedicu porast cijene svih čeličnih proizvoda, pa tako i brodograđevnog čelika. Ukupna svjetska brodogradnja nije nažalost faktor koji može utjecati na kretanje cijena proizvoda od čelika, zbog malog učešća svoje konzumacije (svega oko 2%) u ukupnoj potrošnji, odnosno proizvodnji čelika.

Otvaranje kineskog gospodarstva svjetskom tržištu je imalo za posljedicu ulazak mnogih kompanija u kineski ekonomski prostor i preseljenje velikog broja proizvodnih pogona u Kinu, prvenstveno zbog niskih cijena radne snage. To je uzrokovalo veliko povećanje prekomorskog prijevoza dobara prema Kini i iz Kine, što je posljedično rezultiralo porastom potražnje brodskog prostora, a slijedom toga i porastom vozarina. Porasla je potražnja za novogradnjama, te stoga i cijene novogradnji.

U ovoj su situaciji brodogradilišta pokušala postići poboljšanje poslovanja ograničenim instrumentima koja su imala na raspolaganju: uvođenjem „klizne skale“ čelika i

ugovaranjem cijene novogradnji u „košari valuta“. Međutim, evidentno se pokazalo da se problem ne može riješiti samo promjenom navedenih komercijalnih uvjeta. Efekti eventualnih dodatnih ekonomskih instrumenata (npr. „hedging“ dolarskih priljeva) su upitni, kako u mogućnosti realizacije, tako i u kvantiteti mogućih pozitivnih učinaka.

Usporavanje kineskog ekonomskog rasta i financijsko-gospodarska kriza u zemljama s razvijenim gospodarstvom je dovelo do jednako tako duboke i dugotrajne recesije čija se veličina i značaj još u potpunosti ne mogu sagledati, te je vrlo nezahvalno davati prognoze o dugoročnom kretanju pomorskog i brodograđevnog tržišta. Novi uvjeti poslovanja na globalnom tržištu naglo se mijenjaju: pomorsko tržište trpi veliki pad, tečaj US$ raste prema „košari valuta“, cijena čelika pada, pa zatim opet raste, kapital poskupljuje, cijena sirove nafte se stabilizirala na visokim vrijednostima. U doglednom periodu možemo očekivati nisku potražnju za novogradnjama uz niske cijene brodova. U ovakvoj situaciji brodogradilišta moraju napraviti novi „skok kvalitete“ u pristupu projektu broda ako žele osigurati zaposlenje tijekom narednog vremenskog perioda.

Posebnu pozornost treba posvetiti činjenicama da se zalihe sirove nafte postupno iscrpljuju te da je svjetska javnost izuzetno senzibilirana u odnosu na očuvanje prirodnog okoliša u što većoj mjeri. Smanjivanje zaliha sirove nafte vodi nužno aktiviranju onih nalazišta koja do sada nisu bila komercijalno isplatljiva te je dugoročno za očekivati stalan rast cijene sirove nafte i naftnih derivata. Za očuvanje prirodnog okoliša (makar na sadašnjem nivou) potrebno je, uz ostale aktivnosti, smanjiti emisiju ugljičnog monoksida i dioksida, spojeva sumpora i kisika ($SO_x$) i spojeva dušika i kisika ($NO_x$). Obje te činjenice vode ka jedinstvenom zahtjevu na projekt broda: minimiziranju potrošnje goriva.

Za osiguranje opstanka brodogradilišta više nije dovoljno ni projektiranje brodova primjenom suvremenih metoda optimiranja projekta broda, uključujući i algoritme s metodologijom višeatributnog odlučivanja. Potrebna nova kvaliteta se može postići samo sveobuhvatnom promjenom pristupa projektu broda. Optimalni projekti se moraju tražiti u drugim područjima ukupnog prostora projektnih rješenja, uvažavajući pri tome sve tehničke zahtjeve brodovlasnika, uključujući u optimiranje projekta broda i atribute vezane za eksploataciju broda, te uz donošenje racionalne odluke o izboru optimalnog projekta na osnovi analize mogućih tehničko-komercijalnih scenarija i robustnosti projekta broda u odnosu na moguća kretanja dominantnih ekonomskih parametara.

Osnovna svrha ovog rada je izrada nove metodologije i matematičkih modela koji će omogućiti projektiranje brodova na višem nivou tržišne i ekološke vrijednosti od onih koji su danas dostupni, te koji su robustniji na nepovoljna kretanja ulaznih parametara.

# SAŽETAK

Dosegnut je maksimum kvalitete osnivanja trgovačkih brodova primjenom postojećih metoda i metodologija projektiranja. Tijekom duljeg vremena postignuta su minimalna poboljšanja kvalitete projekata. Suvremeni projekti različitih brodogradilišta se gotovo i ne razlikuju. Napredak u projektiranju je moguć pod uvjetom promjene generalnog pristupa projektnom problemu. Treba promijeniti osnovni pristup osnivanju broda: odbaciti nepotrebna ograničenja, dijelom napustiti „dobru brodograđevnu praksu“, otvoriti projekt broda novim idejama.

Nova metodologija proširuje matematički model, područje ostvarivih projektnih rješenja i broj sudionika u postupku donošenja odluke. Projektni model uključuje, uz elemente koji proistječu iz projektiranja i gradnje broda i parametre, atribute i ciljeve koji proistječu iz eksploatacije broda i analizu robustnosti projektnih rješenja. U odlučivanju sudjeluje, osim projektanta broda i menadžmenta brodogradilišta, i menadžment pomorske kompanije. Pareto fronta nedominiranih projekata je proširena na projekte više komercijalne i ekološke vrijednosti.

Definirani projektni problem je insertiran u DeMak opću optimizacijsku projektnu ljusku i optimiran metodom višeatributne optimizacije. Izloženi su i komentirani primjeri osnivanja dvaju brodova korištenjem nove projektne metode i pripadnih matematičkih modela: Aframax tankera za prijevoz nafte i naftnih derivata i Handymax bulk carrier-a. Projekti dobiveni primjenom nove metodologije su pokazali značajne prednosti u odnosu na suvremene kvalitetne brodove, kako po pitanju komercijalnih, tako i po pitanju ekoloških efekata.

Analizirana je robustnost dobivenih nedominiranih projekata u oba primjera. Analiza je pokazala da su kvalitetniji projekti koji su bliže idealnom rješenju ujedno i robustniji na promjene nekontrolabilnih ulaznih parametara.

## SUMMARY

The design of merchant ships based on existing methods and methodologies has reached its maximum possible quality. During a long period of time, only slight improvements in the quality of designs have been achieved. Modern ships built in different shipyards are almost identical. A breakthrough in the design of merchant ships can be achieved by a radical change in the approach to the design problem. In the novel approach to ship design, excessive constrains have to be removed, the “good shipbuilding practice” has to be reconsider and the ship design has to be open to new ideas.

The new methodology expands the mathematical model, pushes the limits of feasible design solutions and increases the number of stake-holders in the decision-making process. Besides the elements derived from the design and the building procedure of a ship, the mathematical model also includes parameters, attributes and goals derived from the ship exploitation and the sensitivity analysis of developed designs. The decision makers (decision stake-holders) include the ship designer and the shipyard management in the first place, and the shipping company management. This enables to expand the area of the Pareto non-dominated designs.

The defined design problem is inserted into the DeMak general design shell and optimized by a multiattribute decision-making method. Two examples of design procedure are shown and discussed: design optimisation of an Aframax oil and oil product tanker and a Handymax bulk carrier. The implementation of the new methodology results in commercially more competitive and ecologically more attractive ship designs.

Robustness of both designs has been analysed. It has been shown that better designs (closer to an ideal design) are also more robust to the variation of input parameters.

KLJUČNE RIJEČI

Osnivanje broda, optimizacija, trgovački brod, robustnost projekta

KEY WORDS

Ship basic design, optimization, merchant ship, robust design

# POPIS OZNAKA I KRATICA

| | |
|---|---|
| $A$ | faktor za izračunavanje *cGT-a* |
| $B^*$ | faktor za izračunavanje *cGT-a* |
| $B$ | širina broda, m |
| 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 |
| $C_{can}$ | trošak kanala i plovnih putova, US$ |
| $C_{cap}$ | trošak kapitala, US$ |
| $C_{car}$ | trošak prekrcaja tereta, US$ |
| $C_{claim}$ | trošak oštećenja tereta, US$ |
| $C_{crew}$ | trošak posade, US$ |
| $C_D$ | korekcija nadvođa za visinu broda na boku, mm |
| $C_{dock}$ | trošak periodičnog održavanja broda, US$ |
| $c_{fuel}$ | jedinična cijena goriva, US$/t |
| $C_{fuel}$ | trošak goriva, US$ |
| $C_{gen}$ | opći trošak, US$ |
| $c_{gwst}$ | odnos bruto/neto mase čelika |
| $C_{ins}$ | trošak osiguranja, US$ |
| $C_{forA}$ | korekcija A nadvođa za kaštel, mm |
| $C_{forB}$ | korekcija B nadvođa za kaštel, mm |
| $C_{lab}$ | cijena rada (procesa), US$ |
| $C_{load}$ | trošak ukrcaja tereta, US$ |
| $C_{main}$ | trošak tekućeg održavanja, US$ |
| $C_{mat}$ | cijena materijala, US$ |
| $C_{me}$ | cijena porivnog stroja, € |
| $C_{nb}$ | cijena novogradnje, US$ |
| $C_{nb\text{-}stand}$ | cijena „standardne“ novogradnje, US$ |
| $C_{op}$ | trošak operiranja broda, US$ |
| $C_{port}$ | trošak lučkih pristojbi, US$ |
| $C_{tug}$ | trošak remorkera i pilota, US$ |
| $C_{pt}$ | preostali troškovi, US$ |
| $C_{pt\ fix}$ | preostali fiksni troškovi, € |
| $C_{pt\ var}$ | udio preostalih varijabilnih troškova, % |
| $C_{res}$ | cijena preostalog materijala i opreme, € |
| $C_{run}$ | trošak eksploatacije broda financiranja poslovanja, US$ |
| $c_{scrap}$ | jedinična otpadnog čelika, US$/t |
| $C_{sh}$ | vrijednost broda nakon perioda eksploatacije, US$ |
| $C_{sheer}$ | korekcija nadvođa za palubni skok, mm |
| $c_{st}$ | prosječna jedinična cijena čelika, US$/t |
| $C_{st}$ | cijena čelika, US$ |
| $C_{stor}$ | trošak zaliha i maziva, US$ |
| $C_{un}$ | trošak iskrcaja tereta, US$ |

| | |
|---|---|
| $C_{voy}$ | trošak putovanja, US$ |
| $CB_{fuel}$ | godišnji trošak goriva u režimu plovidbe broda u balastu, US$ |
| $CC_{fuel}$ | godišnji trošak goriva u režimu plovidbe natovarenog broda, US$ |
| $CL_{fuel}$ | godišnji trošak goriva u režimu ukrcaja tereta, US$ |
| $CU_{fuel}$ | godišnji trošak goriva u režimu iskrcaja tereta, US$ |
| cGT | kompenzirana bruto tona |
| *CSR* | trajna snaga u službi, kW |
| $\boldsymbol{d}$ | n-torka projektnih parametara |
| $d_s$ | maksimalni gaz, m |
| *D* | visina broda na boku, m |
| $D_{prop}$ | promjer propelera, m |
| *DEP* | prosječna godišnja stopa deprecijacije vrijednosti broda, % |
| *DW* | ukupna nosivost, t |
| *ER* | odnos €/US$ |
| $f_1$ | 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 |
| $F_A$ | minimalno A nadvođe, mm |
| $F_B$ | minimalno B nadvođe, mm |
| $f_{ball}$ | faktor smanjenja potrošnje goriva porivnog stroja kod plovidbe u balastu u odnosu na potrošnju natovarenog broda |
| $F_{tA}$ | tablično A nadvođe, mm |
| $F_{tB}$ | tablično B nadvođe, mm |
| $F_{B\text{-}60}$ | sniženo minimalno B nadvođe (B-60), mm |
| FFE | faktorski parcijalni eksperimenti |
| $FOCC_{aux}$ | dnevna potrošnja pom. strojeva u režimu plovidbe natovarenog broda, t |
| $FOCB_{aux}$ | dnevna potrošnja pomoćnih strojeva u režimu plovidbe broda u balastu, t |
| $FOCL_{aux}$ | dnevna potrošnja pomoćnih strojeva u režimu ukrcaja broda, t |
| $FOCU_{aux}$ | dnevna potrošnja pomoćnih strojeva u režimu iskrcaja broda, t |
| $\boldsymbol{g}$ | n-torka projektnih ograničenja |
| *GT* | bruto tona |
| $\boldsymbol{I}$ | jedinična matrica |
| $I_{me}$ | identifikator porivnog stroja |
| IMO | Međunarodna pomorska organizacija |
| *INT* | prosječna godišnja stopa kamate i/ili dividende, % |
| ITTC | Međunarodna konferencija laboratorija za ispitivanje modela |
| $K_1$ | faktor za izračun *GT-a* |
| $\boldsymbol{l}$ | n-torka vrijednosti subjektivnih preferencija |
| $\boldsymbol{L}$ | set odabranih projekata |
| $L_1$ | linearna metrika, „city block“ ili „Manhattan block“ mjera distance |
| $L_2$ | kvadratna metrika, „geometrijska“ mjera distance |
| $L_\infty$ | Čebiševljeva metrika |

| | |
|---|---|
| $L(y)$ | funkcija gubitka |
| $L_F$ | duljina broda za potrebe proračuna minimalnog nadvođa, m |
| $L_p$ | metrika, norma udaljenosti |
| $L_{pp}$ | duljina broda između perpendikulara, m |
| LNG | prirodni ukapljeni plin |
| LPG | ukapljeni petrolejski plin |
| $LS$ | vlastita masa broda, t |
| $LSL$ | zadana donja granica karakteristike |
| $\boldsymbol{M}^{\boldsymbol{N}}$ | podskup nedominiranih projekta u subjektivnom normaliziranom prostoru |
| $\boldsymbol{M}^{\geq}$ | subjektivni normalizirani prostor |
| MADM | višeatributno donošenje odluke (multiattribute decision making) |
| MCDM | višekriterijsko donošenje odluke (multicriteriadecision making) |
| $MCR$ | maksimalna trajna snaga, kW |
| MODM | višeciljno donošenje odluke (multiobjective decision making) |
| $nv$ | broj projektnih varijabli |
| $\boldsymbol{o}$ | n-torka projektnih ciljeva |
| $O_{year}$ | broj dana u kojima je brod van najma, dan/godina |
| $OA$ | ortogonalna polja |
| OECD | Organizacija za gospodarsku suradnju i razvoj |
| $\boldsymbol{p}$ | n-torka značaja atributa |
| $P$ | profit broda, US$ |
| $\boldsymbol{P}$ | matrica subjektivnih relativnih preferencija |
| $P_{cGT}$ | proizvodnost brodogradilišta, rs/cGT |
| $R_{day}$ | dnevni najam broda, US$ |
| $R_{year}$ | godišnji prihod broda, US$ |
| $ROB$ | atribut robustnosti |
| $SFOC$ | specifična potrošnja porivnog stroja, t/kWh |
| $SMCR$ | selektirana maksimalna trajna snaga, kW |
| $SNR$ | omjer signal/šum |
| SSPA | Švedski pomorski istraživački centar |
| $T$ | ciljana vrijednost |
| $T_{ball}$ | vrijeme plovidbe broda u balastu, dan/godina |
| $T_{car}$ | vrijeme plovidbe natovarenog broda, dan/godina |
| $T_{exp}$ | period eksploatacije broda, godina |
| $T_{load}$ | vrijeme provedeno na ukrcaju broda, dan/godina |
| $T_{un}$ | vrijeme provedeno na iskrcaju broda, dan/godina |
| TEU | standardni 20-stopni container (twenty-foot equivalent unit) |
| $U(y(x))$ | subjektivna mjera zadovoljenja atributa $y$ |
| $USL$ | zadana gornja granica karakteristike |
| $\boldsymbol{v}$ | n-torka funkcija kvalitete projekta |
| $V$ | ukupni zatvoreni volumen broda, $m^3$ |
| $V_{car}$ | volumen teretnog prostora, $m^3$ |
| $V_{for}$ | volumen kaštela, $m^3$ |
| $V_{sup}$ | volumen nadgrađa, konstrukcije ispod dimnjaka, palubnih kućica, grotala tereta i poklopaca, $m^3$ |
| $V_{cam}$ | volumen preluka, $m^3$ |
| $V_D$ | volumen trupa broda do visine na boku, $m^3$ |

| | |
|---|---|
| $v_{lab}$ | jedinična satnica, €/rs |
| VLCC | „vrlo veliki“ tanker za prijevoz sirovog ulja (nosivosti oko 300000 dwt) |
| $w$ | težinski faktor |
| $W_m$ | masa strojo opreme, t |
| $W_o$ | masa ostale opreme, t |
| $W_{st}$ | masa čelične konstrukcije, t |
| $V_{service}$ | brzina u službi, čv |
| $v_{tr}$ | brzina na pokusnoj plovidbi, čv |
| $\boldsymbol{x}$ | n-torka projektnih varijabli, točka u projektnom prostoru, projekt |
| $\boldsymbol{X}$ | projektni prostor |
| $\boldsymbol{X^N}$ | podprostor projektnih varijabli koje pripadaju podprostoru nedominiranih projekata $\boldsymbol{Y^N}$ |
| $\boldsymbol{X^{\geq}}$ | podprostor ostvarivih projekata |
| $\boldsymbol{y}$ | n-torka projektnih atributa , točka u prostoru atributa |
| $\boldsymbol{Y}$ | prostor atributa |
| $\boldsymbol{Y^N}$ | podprostor nedominiranih projekta, Pareto fronta |
| $\boldsymbol{Y^{\geq}}$ | skup optimalnih projekata u prostoru atributa |
| $\boldsymbol{y^*}$ | utopija, idealni projekt |
| $\gamma_{tot}$ | specifična masa morske vode s uključenim utjecajem oplate broda i privjesaka, $t/m^3$ |
| $\Delta$ | istisnina broda, t |
| $\kappa$ | „specifična voluminoznost broda“ |
| $\lambda_i$ | vlastite vrijednosti problema |
| $\mu$ | srednja vrijednost |
| $\sigma$ | standardna devijacija |
| $\sigma^2$ | varijanca |

POPIS SLIKA

Slika 1 Suvremeni tankeri 26

Slika 2 Suvremeni bulk carrieri 26

Slika 3 Suvremeni brodovi za prijevoz container-a 27

Slika 4 Principijelni prikaz nove metodologije u prostoru atributa 28

Slika 5 Blok shema nove projektne procedure 30

Slika 6 Ekstrapolacija varijabli izvan područja suvremenih projekata na primjeru 3-d projektnog prostora 31

Slika 7 Ispitivanje ostvarivosti projekta u ekstrapoliranim područjima 33

Slika 8 Indeks cijena novogradnji [D1] 35

Slika 9 Tipično ponašanje pomorskog tržišta [21] 36

Slika 10 Indeks cijena polovnih tankera i bulk carrier-a [D1] 40

Slika 11 Kretanje cijena otpadnog čelika [D1] 41

Slika 12 Tečaj US$ i € prema kuni [D2] 43

Slika 13 Kretanje cijene brodograđevnog čeličnog lima od 2001. godine do danas [D3] 44

Slika 14 Kretanje cijene teškog goriva (Roterdam, 380 cst) od 2004. godine do danas [D1] 46

Slika 15 Blok shema opće projektne procedure 48

Slika 16 Selektiranje snage porivnog stroja 63

Slika 17 Optimiranje porivnog stroja i propelera 64

Slika 18 Indeks pomorskog tržišta od 2003. godine do danas [D1] 72

Slika 19 Podjela troškova eksploatacije broda i financiranja poslovanja [21] 74

Slika 20 Tržišna vrijednost polovnih panamax bulk carrier-a prodanih tijekom prvih devet mjeseci 2002. godine [21] 75

Slika 21 Blok shema modula eksploatacije broda 83

Slika 22 Mogućnost proširenja projektnog prostora ekstrapolacijom projektnih varijabli 85

Slika 23 Određivanje novog projektnog prostora 87

Slika 24 Određivanje podobnih porivnih strojeva 88

Slika 25 Projektni problem [15] 96

Slika 26 „Ω“ oblik neizrazite funkcije (privlačenje) [12] 97

Slika 27 „U“ oblik neizrazite funkcije (odbijanje) [14] 98

Slika 28 „Z“ oblik neizrazite funkcije (silazni oblik) [14] 98

Slika 29 „S“ oblik neizrazite funkcije (uzlazni oblik) [14] 99

Slika 30 DeMak okolina za postupak potpore donošenju odluke [15] 105

Slika 31 Peterodimenzijska vizualizacija prostora atributa (WGT = masa konstrukcije, ROB = mjera robustnosti konstrukcije, INF = informatički sadržaj projekta, boja/veličina = udaljenost od ideala u $L_1/L_2$ normama) [15] 107

Slika 32 Postupak proračuna robustnosti i pripadne funkcije [51] 114

Slika 33 Redukcija broja eksperimenata na primjeru sa 7 parametara na 2 nivoa [53] 116

Slika 34 Linearni grafovi [53] 120

Slika 35 Najmanje je najbolje [51] 123

Slika 36 Nominalno je najbolje [51] 124

Slika 37 Najveće je najbolje [51] 125

Slika 38 Grafički prikaz neizrazitih funkcija kod osnivanja Aframax tankera 137

Slika 39 Grafički prikaz međuatributnih preferencija kod osnivanja Aframax tankera 139

Slika 40 Nedominirani projekti Aframax tankera u $W_{st} – C_{nb} – P – v_{tr}$ prostoru s $L_1$ metrikom 147

Slika 41 Nedominirani projekti Aframax tankera u $W_{st} – C_{nb} – P – v_{tr}$ prostoru s $L_\infty$ metrikom 148

Slika 42 Nedominirani projekti Aframax tankera u $W_{st} – C_{nb} – P – v_{tr}$ prostoru s $L_2$ metrikom 149

Slika 43 Nedominirani projekti Aframax tankera u $v_{tr} – C_{nb} – P – SMCR$ prostoru s $L_2$ metrikom 150

Slika 44 Preferirani projekti Aframax tankera u $W_{st} – C_{nb} – P – v_{tr}$ prostoru s $L_2$ metrikom (1) 151

Slika 45 Nedominirani projekti Aframax tankera u $L_{pp} – B – d_s – C_B$ prostoru s $L_2$ metrikom 152

Slika 46 Preferirani projekti Aframax tankera prikazani na paralelnim osima (1) 153

Slika 47 Preferirani projekti Aframax tankera prikazani na paralelnim osima (2) 154

Slika 48 Preferirani projekti Aframax tankera u $W_{st} – C_{nb} – P – v_{tr}$ prostoru s $L_2$ metrikom (2) 158

Slika 49 Preferirani projekti Aframax tankera prikazani na paralelnim osima (3) 159

Slika 50 Nedominirani projekti Aframax tankera u $SNR – \sigma^2 – P – v_{tr}$ prostoru s $L_2$ metrikom 163

Slika 51 Nedominirani projekti Aframax tankera u $v_{tr} – \sigma^2 – SNR – P$ prostoru s $L_2$ metrikom 164

Slika 52 Nedominirani projekti Aframax tankera u $L_{pp} – \sigma^2 – SNR – P$ prostoru s $L_2$ metrikom 165

Slika 53 Nedominirani projekti Aframax tankera u $L_{pp} – C_B – SNR – P$ prostoru s $L_2$ metrikom 166

Slika 54 Nedominirani projekti Aframax tankera u $L_{pp} – B – C_B – SNR – \sigma^2$ prostoru 167

Slika 55 Nedominirani projekti Aframax tankera u $v_{tr} – SMCR – P – SNR – \sigma^2$ prostoru 168

Slika 56 Grafički prikaz neizrazitih funkcija kod osnivanja Handymax bulk carrier-a 177

Slika 57 Grafički prikaz međuatributnih preferencija kod osnivanja Handymax bulk carrier-a 178

Slika 58 Nedominirani projekti Handymax bulk carrier-a u $W_{st} – C_{nb} – P – v_{tr}$ prostoru s $L_1$ metrikom 187

Slika 59 Nedominirani projekti Handymax bulk carrier-a u $W_{st} – C_{nb} – P – v_{tr}$ prostoru s $L_\infty$ metrikom 188

Slika 60 Nedominirani projekti Handymax bulk carrier-a u $W_{st} – C_{nb} – P – v_{tr}$ prostoru s $L_2$ metrikom 189

Slika 61 Nedominirani projekti Handymax bulk carrier-a u $v_{tr} – C_{nb} – P – SMCR$ prostoru s $L_2$ metrikom 190

Slika 62 Preferirani projekti Handymax bulk carrier-a u $W_{st} – C_{nb} – P – v_{tr}$ prostoru s $L_2$ metrikom (1) 191

Slika 63 Nedominirani projekti Handymax bulk carrier-a u $L_{pp} – B – d_s – C_B$ prostoru s $L_2$ metrikom 192

Slika 64 Preferirani projekti Handymax bulk carrier-a prikazani na paralelnim osima (1) 193

Slika 65 Preferirani projekti Handymax bulk carrier-a prikazani na paralelnim osima (2) 194

Slika 66 Preferirani projekti Handymax bulk carrier-a u $W_{st} – C_{nb} – P – v_{tr}$ prostoru s $L_2$ metrikom (2) 198

Slika 67 Preferirani projekti Handymax bulk carrier-a prikazani na paralelnim osima (3) 199

Slika 68 Nedominirani projekti Handymax bulk carrier-a u $SNR – \sigma^2 – P – v_{tr}$ prostoru s $L_2$ metrikom 203

Slika 69 Nedominirani projekti Handymax bulk carrier-a u $v_{tr} – \sigma^2 – SNR – P$ prostoru s $L_2$ metrikom 204

Slika 70 Nedominirani projekti Handymax bulk carrier-a u $d_s – \sigma^2 – SNR – P$ prostoru s $L_2$ metrikom 205

Slika 71 Nedominirani projekti Handymax bulk carrier-a u $d_s – C_B – SNR – P$ prostoru s $L_2$ metrikom 206

Slika 72 Nedominirani projekti Handymax bulk carrier-a u $d_s – C_B – P – SNR – – \sigma^2$ prostoru 207

Slika 73 Nedominirani projekti Handymax bulk carrier-a u $v_{tr} – SMCR – P – – SNR – \sigma^2$ prostoru 208

POPIS TABLICA

Tablica 1 Ograničenja projektnih varijabli 32

Tablica 2 Ograničenja odnosa projektnih varijabli 32

Tablica 3 Ograničenja pojedinih atributa 32

Tablica 4 Ograničenja projektnih varijabli kod osnivanja broda 57

Tablica 5 Ograničenja odnosa projektnih varijabli kod osnivanja broda 57

Tablica 6 Faktori *A* i *B** za izračun *cGT-a* 68

Tablica 7 Minimalni i maksimalni dnevni najam tankera i brodova za rasute terete tijekom 2007., 2008. i 2009. godine [D1] 71

Tablica 8 Primjer izračuna vrijednosti polovnog broda 76

Tablica 9 Projektni parametri ***d*** 90

Tablica 10 Projektni atributi ***y(x,d)*** 91

Tablica 11 Projektni ciljevi **o** 91

Tablica 12 Definicija odnosa među atributima prema Saaty-u [18] 99

Tablica 13 Ortogonalno polje L8 [53] 118

Tablica 14 Pridruživanje faktora i interakcija (linearni graf tip (b)) kod L8 ortogonalnog polja [53] 121

Tablica 15 Osnovna svojstva ortogonalnih polja [51] 121

Tablica 16 Variranje projektnih parametara trgovačkog broda 126

Tablica 17 Ortogonalno polje L9 127

Tablica 18 Suvremeni Aframax tankeri 128

Tablica 19 Projektni zahtjev za Aframax tanker 129

Tablica 20 Početno ekstrapolirano područje osnovnih izmjera Aframax tankera 130

Tablica 21 Ograničenja osnovnih izmjera Aframax tankera 130

Tablica 22 Novo projektno područje osnovnih izmjera Aframax tankera 130

Tablica 23 Porivni strojevi za moguću ugradnju u Aframax tanker 131

Tablica 24 Novi projektni prostor Aframax tankera 131

Tablica 25 Projektni parametri $\boldsymbol{d}_{dsgn}$ proizašli iz projekta i gradnje Aframax tankera 132

Tablica 26 Projektni parametri $\boldsymbol{d}_{exp}$ proizašli iz eksploatacije Aframax tankera 134

Tablica 27 Ograničenja projektnih varijabli $\boldsymbol{g}_{min\text{-}max}$ Aframax tankera 135

Tablica 28 Ograničenja odnosa projektnih varijabli $\boldsymbol{g}_{ratios}$ Aframax tankera 135

Tablica 29 Neizrazite funkcije pridružene pojedinim atributima Aframax tankera 137

Tablica 30 Zadane preferencije među atributima Aframax tankera 138

Tablica 31 Zadani koraci pojedinih atributa Aframax tankera 140

Tablica 32 Granice baze podataka Aframax tankera 141

Tablica 33 Usporedba suvremenog Aframax tankera i preferiranog projekta 155

Tablica 34 Usporedba preferiranih projekata prema ostvarenoj brzini $v_{tr}$ 156

Tablica 35 Variranje projektnih parametara Aframax tankera 160

Tablica 36 Suvremeni Handymax bulk carrieri 169

Tablica 37 Projektni zahtjev za Handymax bulk carrier 170

Tablica 38 Početno ekstrapolirano područje osnovnih izmjera Handymax bulk carrier-a 171

Tablica 39 Ograničenja osnovnih izmjera Handymax bulk carrier-a 171

Tablica 40 Novo projektno područje osnovnih izmjera Handymax bulk carrier-a 171

Tablica 41 Porivni strojevi za moguću ugradnju u Handymax bulk carrier 172

Tablica 42 Novi projektni prostor Handymax bulk carrier-a 172

Tablica 43 Projektni parametri $\boldsymbol{d}_{dsgn}$ proizašli iz projekta i gradnje Handymax bulk carrier-a 173

Tablica 44 Projektni parametri $\boldsymbol{d}_{exp}$ proizašli iz eksploatacije Handymax bulk carrier-a 174

Tablica 45 Ograničenja projektnih varijabli $\boldsymbol{g}_{min\text{-}max}$ Handymax bulk carrier-a 175

Tablica 46 Ograničenja odnosa projektnih varijabli $\boldsymbol{g}_{ratios}$ Handymax bulk carrier-a 175

Tablica 47 Neizrazite funkcije pridružene pojedinim atributima Handymax bulk carrier-a 176

Tablica 48 Zadane preferencije među atributima Handymax bulk carrier-a 178

Tablica 49 Zadani koraci pojedinih atributa Handymax bulk carrier-a 179

Tablica 50 Granice baze podataka Handymax bulk carrier-a 180

Tablica 51 Usporedba suvremenog Handymax bulk carrier-a s preferiranim projektom 195

Tablica 52 Usporedba preferiranih projekata prema ostvarenoj brzini $v_{tr}$ 196

Tablica 53 Variranje projektnih parametara Handymax bulk carrier-a 200

# 1 UVOD

U radu je prezentirana nova metodologija projektiranja suvremenih trgovačkih brodova, kojom je unapređen dosadašnji pristup projektiranju broda. Nova metodologija u proces donošenja odluke uključuje, kako atribute i ciljeve koji proistječu iz projekta i izgradnje broda, tako i atribute i ciljeve koji proistječu iz eksploatacije broda. Broj sudionika koji donose odluku o izboru optimalnog projekta je proširen, pa je osim projektanta i management-a brodogradilišta uključen i management pomorske kompanije.

Nova metodologija se zasniva na pretpostavci da je proširenjem optimizacijskog modela moguće generirati Pareto frontu projektnih rješenja veće komercijalne i ekološke vrijednosti od postojećih rješenja, te manje osjetljivosti na promjene nekontrolabilnih ulaznih parametara koji utječu na rezultat optimizacijskog procesa. Na toj je osnovi izrađen novi matematički model koji omogućuje projektiranje i realizaciju optimalnih projekata trgovačkih brodova kvalitetno višeg nivoa.

Izloženi projektni model je razvijan i unapređivan tijekom niza godina. Osnove projektnog modela su objavljene 1976. godine od strane Watson-a i Gilfillan-a [1]. Taj se rad može u mnogočemu smatrati temeljnim radom koji je omogućio razvitak kompjutersko orijentiranih projektnih procedura i modela. Autori su podijelili brodove u tri kategorije prema pristupu projektu: brodove kojima u projektu dominira zadovoljenje ukupne nosivosti, brodove kojima dominira zadovoljenje volumena teretnog prostora i brodove u čijem je projektu potrebno zadovoljiti zahtjeve i ograničenja linearnih dimenzija. U radu su izložene statistike i preporuke za osnovne izmjere i odnose osnovnih izmjera pojedinih tipova i veličina brodova. Objavljeni su iskustveni podaci i jednakosti za približne proračune snage porivnog stroja i vlastite mase broda. Izložena je projektna procedura koja je omogućavala realizaciju kvalitetnog projekta broda u nekoliko koraka projektne spirale, a objavljen je i prijedlog jednostavne kompjuterske aplikacije za projektiranje broda.

Objavljeni projektni model je daljnje usavršavan, pa 1998. godine Watson objavljuje sveobuhvatan rad o projektiranju brodova [2]. U radu zadržava prethodno objavljenu osnovnu podjelu projekata brodova i proširuje je problematikom osnivanja ratnih brodova. Detaljno analizira glavne izmjere broda i njihove međusobne odnose. Posebnu pažnju posvećuje odabiru brodske forme i hidrodinamičkim karakteristikama pojedinih tipova forme. Izlaže više metoda za proračun otpora broda i prognozu brzine. Detaljno se posvećuje problematici izbora porivnog postrojenja, projektiranja brodske čelične konstrukcije, proračunu nadvođa i pregrađivanja. Daje pregled međunarodne regulative koja utječe na osnivanje broda i osnove suvremenog proračuna stabiliteta. Naročito zanimljivo je posvećivanje pažnje procjeni cijene koštanja broda i ekonomiji operiranja broda. Primjena izložene metodologije se i dalje zasniva na tzv. „projektnoj spirali“, što donosi i svoje prednosti (projektantu je moguće projektirati manje poznate tipove i/ili veličine brodova) i svoje nedostatke (izvedba projekta konzumira dosta vremena, postupak je neprikladan za projektiranje suvremenim optimizacijskim tehnikama).

Američko udruženje inženjera brodogradnje i strojarstva SNAME izdaje u gotovo pravilnim vremenskim razmacima (1955, 1969, 1980. i 2003. godine) kapitalna djela koja pokrivaju područje pomorske tehnike, brodogradnje i projektiranja. Posljednje izdanje uređeno od strane Lamb-a [3] publicirano je 2003. godine. U prvom svesku je, među ostalim, obrađeno područje projektiranja broda, međunarodne regulative i zahtjeva klasifikacijskih društava, procjene cijene koštanja broda, parametarskog projektiranja i specijalističkih kompjutorskih alata. Proces osnivanja broda je prikazan u tradicionalnoj „projektnoj spirali“, pa izloženi postupak nije potpuno prikladan za provedbu optimizacije projekta. Kod procjena cijene koštanja novogradnje posebna je pažnja posvećena cijeni procesa (rada) te snižavanju cijene rada kod proizvodnje brodova u seriji. Projektantska iskustva, razmišljanja i preporuke su izložene u dijelu koji se odnosi na parametarsko projektiranje. Grafički su prikazani iskustveni podaci i statistike odnosa glavnih izmjera za pojedine tipove brodova te osnovne karakteristike brodskih formi. Predloženi su izrazi za procjenu glavnih grupa mase broda, snage porivnog stroja i stupnja djelovanja propulzijskog sustava. Prikazani su načini procjene manevrabilnosti i pomorstvenosti broda, te su iznijete preporuke za pojedine tipove brodova. Izložene su osnove višekriterijske optimizacije projekta broda koje su poslužile kao baza za razvoj složenijih optimizacijskih algoritama.

U drugom svesku su objavljeni primjeri projektiranja raznih tipova brodova (višenamjenskih brodova, brodova za prijevoz rashlađenih tereta, tankera, bulk carrier-a, brodova za prijevoz ukapljenog plina, brodova za prijevoz automobila, Ro-Ro brodova, brodova za prijevoz container-a, putničkih brodova, trajekata, ribarskih brodova, tegljača, višetrupnih brodova, itd.). Prikazane su specifičnosti osnivanja i konstruiranja pojedinih tipova brodova, brodske konstrukcije i brodskih sustava. Opisane su specifičnosti pojedinih tereta i načini operiranja brodova. Objavljene su projektantske preporuke i statistike vezane za izradu projekta broda. Ovaj bi se rad mogao smatrati „brodograđevnom enciklopedijom“.

Prethodno kratko opisana literatura je poslužila kao osnova za izradu konkretnih algoritama i programskih aplikacija za optimizaciju projekta broda. Uz to, brz razvoj elektroničkih računala i programa opće, matematičke, fizikalne i inženjerske namjene je stvorio preduvjete za izradu specijaliziranih software-a za optimizaciju, kako pojedinih proizvoda i procesa, tako i projekata brodova, brodske konstrukcije i brodskih sustava.

Praktična primjena višekriterijske optimizacija projekta broda je započela jednostavnijim optimizacijskim postupcima. 1992. godine Belamarić i dr. objavljuju rad [4] koji se bavi optimiranjem projekta Suezmax tankera u odnosu na dva dominantna cilja: minimiziranje mase čelične konstrukcije i minimiziranje snage porivnog stroja. Pretraživanje prostora ostvarivih projekata se provodi postupkom enumeracije. Optimalni projekti su generirani ponderiranjem nenormaliziranih projektnih ciljeva.

Daljnje usavršavanje matematičkog modela osnivanja broda i proširenje modela na ostale tipove brodova je objavio Čudina [5,6]. U tim se radovima autor bavio optimiranjem projekta Handymax bulk carrier-a i Suezmax tankera nove generacije (nakon proširenja Sueskog kanala). U odnosu na prethodno navedeni rad [4], poboljšanja matematičkog modela su provedena kvalitetnijim aproksimacijama snage

porivnog stroja i minimalnog nadvođa. Uvedena je opća projektna procedura koja ne pretpostavlja kruženje u „projektnoj spirali“, čime je olakšan razvoj specijaliziranih programskih aplikacija.

Rezultate primjene novih aplikacija na optimiranje projekata brodova objavio je Čudina [7,8,9,10]. U okviru razvojnog projekta Brodosplita „Supercargo“ izrađeni su optimirani projekti Panamax bulk carrier-a, Suezmax tankera, Aframax tankera i LR2 tankera za naftne derivate. Posebno je zanimljivo da je prema ovim projektima u Brodosplitu izgrađen veći broj novogradnji.

Za rad koji su 1999. godine objavili Belamarić i dr. [11] se može reći da predstavlja posljednji rad u nizu prethodno opisanih članaka koji su se bavili dvokriterijskim optimiranjem projekata trgovačkih brodova. Projekt Suezmax tankera je optimiran s ciljevima minimiziranja mase čelične konstrukcije i minimiziranja snage porivnog stroja. Analizirana je pouzdanost projektnog modela.

Žanić i dr. 1992. godine objavljuju [12] u kojem predstavljaju metodu višeatributnog odlučivanja prilikom optimizacije projekta broda. U tom je radu uvedeno rješavanje problema projektiranja broda pridruživanjem točke (sa skupom projektnih varijabli) iz projektnog prostora odgovarajućoj točki (sa skupom projektnih svojstava) iz skupa projektnih atributa. Uveden je višeatributni optimizacijski postupak koji, po svojim karakteristikama, više odgovara optimiranju projekta broda od višeciljnog optimizacijskog postupka. Metoda je primijenjena na primjeru osnivanja ribarskog broda. Selektirano je pet projektnih atributa koji su međusobno (interatributno) vrednovani i kojima su pridijeljeni odgovarajući težinski faktori. Atributi su normalizirani pomoću neizrazitih funkcija, odnosno, „mekog“ ispunjavanja narinutih funkcija subjektivnog zadovoljstva. Rezultat primijenjenog optimizacijskog postupka je porodica nedominiranih projektnih rješenja.

1994. godine Trincas i dr. su se u [13] bavili problemom višeatributnog optimiranja projekta brzog jednotrupnog Ro-Ro broda za zadane rute. Optimizacija je provedena obzirom na pet atributa: brzina broda, broj prikolica, vrijeme između polazaka na ruti, jedinična cijena prijevoza i vrijednost investicije. Autori su posebnu pažnju posvetili utjecaju interatributnih odnosa, pa su njihovim mijenjanjem dobili različita projektna rješenja.

Daljnji razvoj primjene višeatributne potpore procesu donošenja odluke je učinjen od strane Grubišića i dr. [14]. Rad se naslanja na [13], a izlaže unapređeni projektni model. Broj projektnih atributa je proširen na 14. Objavljena je shema procesa višeatributnog odlučivanja. Analizirana je osjetljivost komercijalne vozarine Ro-Ro broda na variranje pet projektnih varijabli (duljina broda, širina, gaz, prizmatični koeficijent i koeficijent glavnog rebra) na tri zadana nivoa i tri ekonomska ulazna parametra (kamatna stopa, omjer posuđenog i vlastitog uloženog kapitala i vrijeme otplate kredita) na tri nivoa. Analiza je provedena pomoću eksperimentalne tehnike ortogonalnih polja. Ovim je radom uveden atribut robustnosti u problematiku optimiranja projekta broda.

Sustavan prikaz tehnike potpore u procesu donošenja odluke kod osnivanja broda i projektiranja brodske strukture je objavio Žanić u [15]. U radu je prezentirana metodologija višekriterijskog donošenja odluke u projektu broda i brodske strukture. Objavljena je osnovna shema rješavanja projektnog problema čime je vizualiziran odnos projektnog prostora, prostora atributa, subjektivnih interatributnih odnosa, subjektivnih intraatributnih preferencija i subjektivnog normaliziranog prostora. Prikazane su norme udaljenosti (metrike) od idealnog projektnog rješenja i primjena vizualne selekcije preferiranog projekta. Objavljena je shema DeMak opće optimizacijske ljuske i razvijena je kompjuterska grafika za postprocesiranje generiranih optimalnih projekata. Ovaj rad je postavio temelje za razvoj korisniku orijentiranih specijalističkih optimizacijskih aplikacija.

Na osnovi prethodno spomenutih radova, prvenstveno [13], Čudina 2006. godine objavljuje [16], a 2008. godine [17]. U DeMak opću optimizacijsku ljusku insertira projektnu proceduru i matematičke modele za osnivanje tankera i bulk carrier-a. Definira projektne atribute koji proizlaze iz projekta i gradnje broda (masa čelične konstrukcije, cijena materijala, cijena rada, cijena novogradnje, ukupna nosivost, brzina broda i volumen tereta) i pripadajuće intraatributne i interatributne preferencije. Primjenom metodologije višekriterijskog donošenja odluke u projektu broda realizira novu generaciju optimalnih projekata tankera i bulk carrier-a.

Žanić i dr. 2009. objavljuju [18] u kojem se naslanjaju na [16,17,18] i iznose dodatno unapređenje specijalističkih aplikacija za višeatributno optimiranje projekta broda i tehnika potpore u procesu donošenja odluke kod osnivanja broda. Metodologija tehnike potpore u procesu donošenja odluke kod osnivanja broda i projektiranja brodske strukture je sustavno izložena i detaljno elaborirana. Analizirani su suvremeni prestižni projekti Capesize bulk carrier-a i Handymax tankera. Izrađene su nove aplikacije za višeatributnu optimizaciju i testirane su na primjerima osnivanja tankera i bulk carrier-a. Postignuti rezultati su pokazali veliku kompetivnost u odnosu na postojeće suvremene brodove.

Analizom robustnosti u definiranju projekta broda i utjecaju na rezultat optimizacijskog postupka su analizirali Diez i dr. [19]. U radu su se bavili optimizacijom projekta bulk carrier-a s zadanim jednim ciljem (jediničnom cijenom prijevoza) i s zadanim dvama ciljevima (jediničnom cijenom prijevoza i njenom standardnom devijacijom). Varirali su osnovne karakteristike broda (duljinu, širinu, visinu, gaz, blok koeficijent i brzinu) u vrlo širokim granicama, a analizirali su robustnost projekta obzirom na variranje dnevnog kapaciteta prekrcaja tereta u luci, ukupnu duljinu rute („round trip“) i jediničnu cijenu goriva. Obzirom da su minimalne i maksimalne vrijednosti variranih parametara zadane u vrlo velikim rasponima (1:11, 1:5 i 1:3), te da su projektna ograničenja (odnosi osnovnih izmjera, relativna brzina, kriterij stabiliteta i min-max ograničenje ukupne nosivosti) također zadana vrlo široko, dobivena su optimalna projektna rješenja koja se jako razlikuju.

Potreba za razvojem ekonomičnijih projekata brodova zajedno s težnjom za očuvanje prirodnog okoliša u najvećoj mogućoj mjeri usmjeravaju projektante prema istraživanju novih načina pristupa projektu broda i odgovarajućih metodologija. Levander objavljuje 2009. godine [20] u kojem naglašava potrebu promjene u pristupu projektiranju broda i

posvećivanju najveće pažnje efikasnom korištenju raspoloživih energetskih resursa uz smanjenje emisije štetnih plinova. U radu daje pregled metodologije projektiranja broda i opću filozofiju operiranja broda, kao i međusobne odnose brodogradilišta, brodovlasnika i operatera broda i njihov utjecaj na projekt broda. Analizira međusobne odnose osnovnih karakteristika brodova (ukupna nosivost u odnosu na istisninu, brzina u odnosu na angažiranu snagu, vlastitu masu broda u odnosu na ukupni volumen broda). Opisuje pokazatelje energetske i ekološke efikasnosti broda, indeks energetske efikasnosti projekta (EEDI – „Energy Efficiency Design Index“) i faktor snage (PF – „Power Factor“) koji mogu poslužiti kao mjera uspješnosti projekta broda. Iznosi moguće načine za smanjenje potrošnje goriva i emisije plinova: povećanje brodova, reduciranje brzine, skraćenje vremena u luci, smanjenje otpora broda, efikasnija propulzija, efikasnije porivno postrojenje, korištenje manje štetnih goriva i razvoj novih tipova brodova i sustava prijevoza.

Na tragu prethodno iznesenih razmišljanja je izrađen i ovaj rad. Očekivanja od primjene izložene metodologije osnivanja broda idu u smjeru postizanja višeg stupnja energetske i ekološke efikasnosti brodova.

# 2 HIPOTEZA I ORGANIZACIJA RADA

Cilj rada je dosezanje više razine kvalitete projekata trgovačkih brodova uvođenjem nove metodologije projektiranja. Postavljena hipoteza istraživanja je da je moguće proširiti Pareto frontu nedominiranih projekata izvan područja suvremenih optimalnih brodova tako da matematički model obuhvati osnivanje, gradnju i eksploataciju broda te robustnost projekta na promjene parametara. Troškovi eksploatacije broda se mogu sniziti za 10-tak % (troškovi goriva za 20-25 %), što je daleko više od ušteda koje se mogu postići primjenom bilo kojih, danas poznatih, unapređenja projekta (kvaliteta forme, podizanje stupnja djelovanja propulzijskog sustava, snižavanje težine optimiranjem čelične konstrukcije).

U početnom poglavlju se kratko opisuju dominantne skupine trgovačkih brodova te osnovna zajednička svojstva i temeljni elementi koji dominantno utječu na postupak osnivanja triju najznačajnijih tipova brodova: tankera, bulk-carriera i brodova za prijevoz container-a. Sažeto su opisani uzroci koji vode odabiru punih brodskih formi te međusobni utjecaji i uzročno-posljedične veze pojedinih utjecajnih faktora i elemenata broda.

Narednim poglavljem su izložene osnove nove metodologije projektiranja trgovačkih brodova. Opisani su svi elementi novog pristupa projektu broda i osnovne prednosti nove metodologije u odnosu na postojeće projektne postupke. U optimizacijski model su uključeni projektni atributi vezani uz projektiranje, gradnju i eksploataciju broda, što omogućuje da se Pareto fronta nedominiranih projekata pozicionira izvan područja suvremenih kvalitetnih projekata. Također je elaborirana potreba ispitivanja šireg prostora mogućih projektnih rješenja, te je, slijedom toga, opisan postupak ekstrapolacije projektnih varijabli izvan područja suvremenih projekata.

Idućom cjelinom su opisane osnove ekonomske eksploatacije trgovačkog broda. Prikazano je kretanje cijena novogradnji, kretanje pomorskog tržišta, zakonitosti u njihovim ponašanjima, te njihova međusobna povezanost. Kratko su opisani načini ostvarivanja prihoda pojedinog broda, troškovi eksploatacije broda i financiranja poslovanja. Konačno je prikazano kretanje cijena polovnog brodovlja i otpadnog čelika te opisana njihova ovisnost o stanju pomorskog tržišta.

U šestom poglavlju je obrađen utjecaj dominantnih vanjskih parametara na projekt i eksploataciju trgovačkog broda. Kao dominantni parametri su izdvojeni: fluktuacija US$, cijena brodograđevnog čelika i cijena pogonskog goriva. Svaki od navedenih parametara je zasebno detaljno opisan uz poseban osvrt na njihova kretanja u posljednjem desetljeću, kao i na mogući utjecaj svakog pojedinog parametra na rezultat optimizacijskog postupka projektiranja broda.

U narednom 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 [7,8,9,10] do korištenja kao osnovnog algoritma matematičkog modela osnivanja

broda u optimizacijskim postupcima [4,5,6,11,16,17,18]. Detaljno su opisani svi pojedini koraci projektne procedure te identificirane projektne varijable, parametri, ograničenja, projektni atributi i mogući projektni ciljevi. Na kraju poglavlja su opisane specifičnosti kod primjene opće projektne procedure na osnivanje brodova za prijevoz container-a, brodova za prijevoz rashlađenih tereta i brodova za prijevoz automobila.

Matematički modul osnivanja trgovačkog broda je detaljno prikazan u osmom poglavlju. Definirani su ulazni podaci: projektne varijable, projektni parametri, projektna ograničenja, atributi i projektni ciljevi. Izloženi su matematički postupci proračuna visine broda, minimalnog nadvođa, minimalne snage porivnog stroja, istisnine i ukupne nosivosti. Proračun vlastite mase broda je prezentiran na način da su predloženi iskustveni izrazi na izračun sastavnih elemenata vlastite mase. Proračun cijene novogradnje je razložen na osnovne skupine (cijene materijala, procesa i preostale troškove), te su izloženi matematički izrazi za proračun pojedinih elemenata.

U narednom poglavlju je izložen ekonomski model eksploatacije trgovačkog broda. Ekonomski model je raščlanjen na osnovne komponente: investicijski trošak, prihode od eksploatacije, troškove eksploatacije i financiranja i cijenu broda nakon eksploatacije. Osnova modela je izvedena iz [21], a podaci o kretanju pojedinih elemenata ekonomskog modela su preuzeti iz ažurne stručne literature.

Matematički model eksploatacije trgovačkog broda je izložen u desetom poglavlju i zasniva se na ekonomskom modelu opisanom u prethodnoj cjelini. Identificirane su projektne varijable, parametri, ograničenja, projektni atributi i projektni ciljevi koji proizlaze iz eksploatacije broda. Matematički modul eksploatacije broda je prikazan blok shemom.

U idućem poglavlju je rekapitulirana nova projektna procedura osnivanja trgovačkog broda. U zajedničku proceduru su integrirani matematički moduli i procedure prethodno izložene u poglavljima 4, 7, 8, 9 i 10. Shematski su prikazani postupci određivanja novog projektnog prostora i određivanja podobnih porivnih strojeva. Tabelarno su prikazane sve projektne varijable, parametri, atributi i ciljevi, kako one koje proizlaze iz projekta i gradnje broda, tako i one koje proizlaze iz eksploatacije broda.

Dvanaestim poglavljem je 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 [12,13,14,15,18,22,23]. Identificirani su svi elementi projektnog problema u skladu s primijenjenom optimizacijskom metodom. Komentirane su pojedine projektne veličine i obrazložene projektantske preporuke za njihovu definiciju.

U narednom poglavlju je opisan problem robustnosti, odnosno senzitivnosti projekta. Kratko je izložen povijesni razvoj ovog problema, opisan je matematički model analize robustnosti, te je izložena primjena analize robustnosti kod projekta trgovačkog broda obzirom na projektne parametre opisane u petom poglavlju: fluktuaciju US$, cijenu brodograđevnog čelika i cijenu pogonskog goriva.

U četrnaestom poglavlju je nova metodologija primijenjena na osnivanje Aframax tankera. Prikupljeni su i tabelarno prikazani su podaci o suvremenim aframax tankerima izgrađenim u brodogradilištima specijaliziranim za gradnju ovakvih brodova. Definirani su projektni zahtjevi temeljem kojih su identificirani pojedini projektni zadaci. Detaljno je definiran matematički model. 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. Analizirana je robustnost projekta u odnosu na promjene parametara koji dominantno utječu na rezultat optimizacijskog procesa.

U narednom poglavlju je nova metodologija primijenjena na osnivanje Handymax bulk carrier-a. Prikupljeni su i tabelarno prikazani su podaci o suvremenim Handymax bulk carrier-ima izgrađenim u brodogradilištima specijaliziranim za gradnju ovakvih brodova. Definirani su projektni zahtjevi temeljem kojih su identificirani pojedini projektni zadaci. Detaljno je definiran matematički model. 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. Analizirana je robustnost projekta u odnosu na promjene parametara koji dominantno utječu na rezultat optimizacijskog procesa.

Završno, šesnaesto poglavlje obuhvaća zaključna razmatranja ovog rada. Komentiran je primijenjeni postupak, uspoređen je s podacima postojećih suvremenih brodova i opisane su moguće prednosti u brodograđevnoj i pomorskoj praksi. Na kraju su izložene sugestije za daljnji razvoj i unapređenje izložene metodologije.

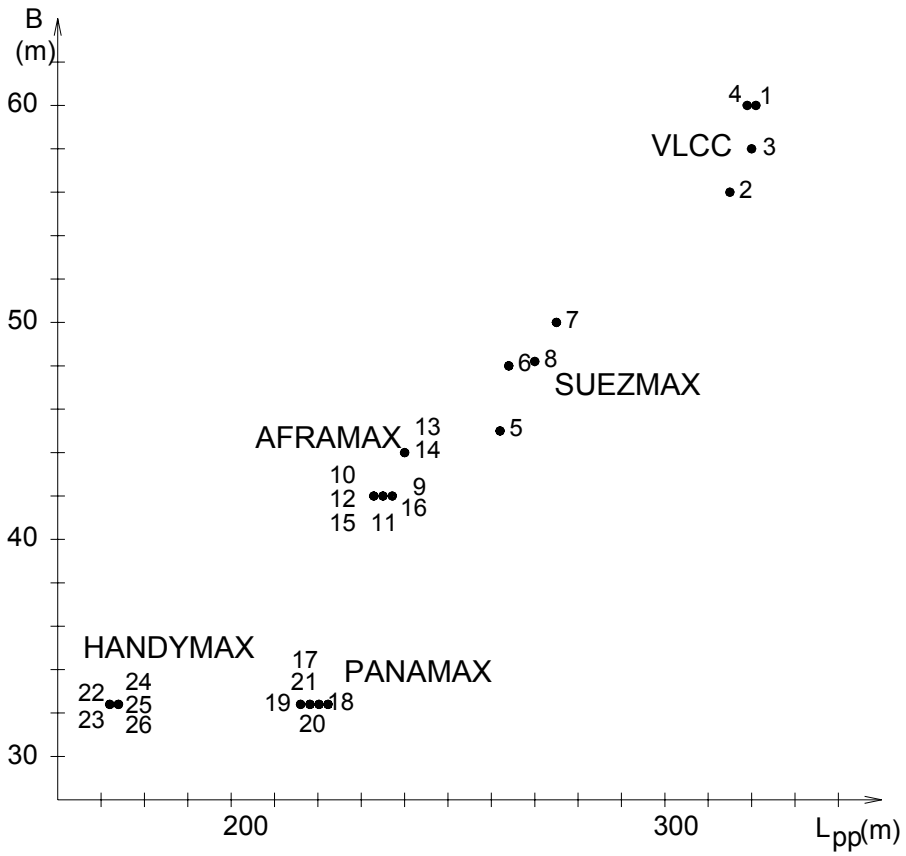
# 3 OSNOVNA SVOJSTVA PROJEKATA SUVREMENIH TRGOVAČKIH BRODOVA

Trgovački brodovi služe za pomorski prijevoz širokog spektra tereta. Najveći dio svjetske flote trgovačkog brodovlja čine tankeri zbog toga što su najzastupljeniji tereti upravo tekući energenti (nafta i naftni derivati, ukapljeni plinovi). Druga dominantna skupina trgovačkog brodovlja su brodovi za prijevoz rasutih tereta (bulk-carrier-i) koji služe za prijevoz velikog broja različitih sipkih tereta (razne rudače, žitarice, metalni poluproizvodi). Posljednjih desetljeća je primjetan porast broja brodova za prijevoz spremnika (container-a) što je uzrokovano sve većom potražnjom za prijevozom raznih dobara bez višestrukog pretovara samog tereta. Naravno, ekspanzija ovog načina prijevoza uvjetovala je i visoki stupanj razvoja cijele transportne infrastrukture: velikih lučkih terminala za prijem najvećih brodova za prijevoz container-a, mreže manjih lučkih terminala za distribuciju container-a manjim brodovima (feeder-ima), željezničkih i kamionskih kapaciteta za distribuciju container-a do krajnjeg odredišta. Združene ove tri skupine brodova predstavljaju dominantnu većinu u svjetskoj trgovačkoj floti.

Preostali dio trgovačkog brodovlja se sastoji od raznih tipova brodova za prijevoz različitih tereta, te su uglavnom specijalizirani za prijevoz jednog tereta ili jedne skupine sličnih tereta. Posebno se mogu izdvojiti brojniji tipovi brodova kao što su: brodovi za prijevoz rashlađenih tereta (reefer-i), brodovi za prijevoz automobila (car-carrier-i), brodovi za prijevoz vozila (trajekti, Ro-Ro brodovi, Ro-Pax brodovi). Od ostalih bi tipova brodova bilo značajno spomenuti brodove za prijevoz općeg (generalnog) tereta. U novije se vrijeme ti brodovi nazivaju i višenamjenskim (multipurpose) brodovima. Ovaj je tip brodova u prošlosti bio značajno više zastupljen u trgovačkoj mornarici, no stalnim rastom prijevoza dobara container-ima, ovaj je tip broda postupno zamijenjen brodovima za prijevoz container-a.

Razvoj tehničkih znanosti i njihova primjena u brodogradnji je dovela do situacije da su projekti trgovačkih brodova dovedeni do nivoa gdje je daljnji napredak vrlo teško ostvariv. Tome je prvenstveno doprinijela globalizacija informacija, izmjene znanja i tekućih dostignuća. Uobičajena je praksa da se projekti novih brodova optimiraju suvremenim optimizacijskim metodama i alatima, da se brodske forme optimiraju numeričkim metodama i modelski ispituju standardiziranim postupcima, da se konstrukcija broda optimira alatima za optimizaciju brodske konstrukcije te da se brodski sustavi detaljno analiziraju i optimiraju. Rezultat takvog pristupa projektu broda je da su svi projekti vrlo slični jedni drugima, te da se međusobno razlikuju tek u nijansama koje ovise o kvaliteti i iskustvu projektnih timova ili o eventualnim specifičnostima pojedinog projektnog zahtjeva.

Ove tvrdnje se mogu jednostavno dokazati kratkom analizom suvremenih standardnih projekata vodećih svjetskih brodogradilišta. Sljedećim slikama su prikazani suvremeni tankeri, bulk carrieri i brodovi za prijevoz container-a izgrađeni u prestižnim svjetskim brodogradilištima.




1. Imabari 310000 dwt
2. Sasebo 250000 dwt
3. Daewoo 300000 dwt
4. Hyundai 317000 dwt

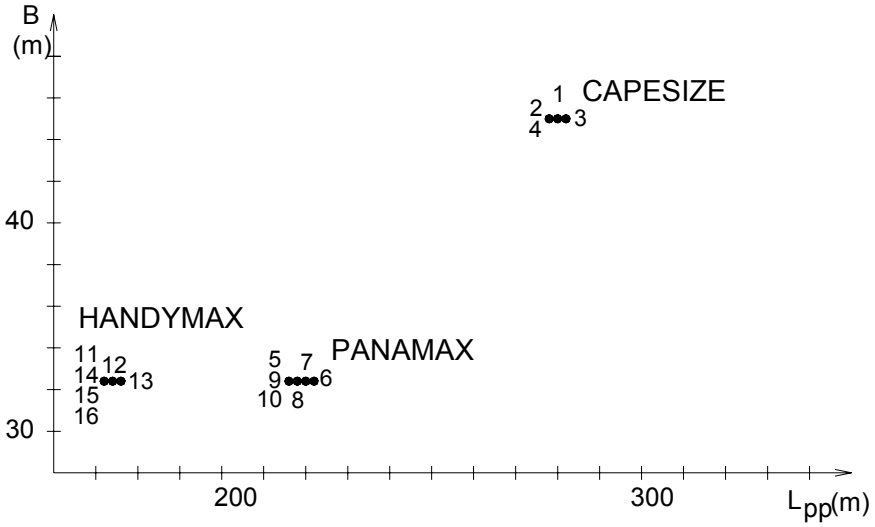
5. Sasebo 150500 dwt
6. Daewoo 159000 dwt
7. Hyundai 166000 dwt
8. Brodosplit 166400 dwt

9. Imabari 107000 dwt
10. Mitsui 110300 dwt
11. Sasebo 115600 dwt
12. Tsuneishi 108700 dwt
13. Daewoo 115000 dwt
14. Samsung 115000 dwt
15. Hyundai 105000 dwt
16. Brodosplit 114000 dwt

17. Imabari 68000 dwt
18. Sasebo 69950 dwt
19. Tsuneishi 70900 dwt
20. Hyundai 75000 dwt
21. Brodosplit 75000 dwt

22. Imabari 48000 dwt
23. Shin Kurus. 46000 dwt
24. Hanjin 44500 dwt
25. Hyundai 46000 dwt
26. Brodosplit 45000 dwt

Slika 1 Suvremeni tankeri

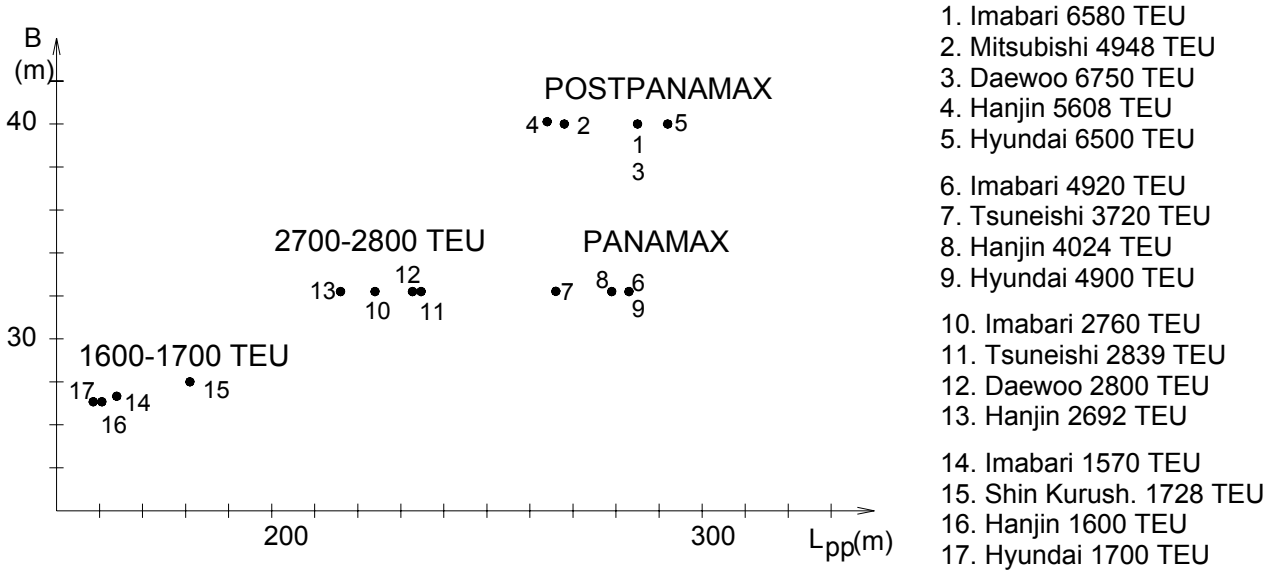



1. Imabari 180000 dwt
2. Sasebo 170600 dwt
3. Waigaoqiao 177800 dwt
4. Hyundai 172000 dwt

5. Imabari 76500 dwt
6. Oshima 82000 dwt
7. Oshima 76000 dwt
8. Sasebo 76800 dwt
9. Tsuneishi 69600 dwt
10. Hyundai 75000 dwt

11. Imabari 53000 dwt
12. Mitsui 55600 dwt
13. Oshima 60000 dwt
14. Shin Kurush. 52000 dwt
15. Zhejiang 53400 dwt
16. Brodosplit 52000 dwt

Slika 2 Suvremeni bulk carrieri




Slika 3 Suvremeni brodovi za prijevoz container-a

Iz prethodnih se slika jasno može uočiti da su sve prikazane skupine brodova grupirane unutar vrlo ograničenih područja, odnosno da su brodovi koji pripadaju pojedinoj skupini vrlo sličnih osnovnih karakteristika. Ovakva situacija je očekivana i potpuno opravdana za pojedine tipove/veličine brodova, pogovo u onim situacijama kad su osnovne izmjere broda (duljina, širina, gaz) ograničene maksimalnim dopuštenim veličinama zbog ograničenja luka, plovnih kanala, dubine mora ili pravila za gradnju broda. U tim slučajevima projektantu ostaje blok koeficijent kao jedina slobodna varijabla za dosezanje željene istisnine, odnosno nosivosti broda [7,8,9,10,16,17,18]. Ova situacija je dovela do razvoja novih kompjuterskih programa i alata za simulaciju strujanja vode oko brodskog trupa te izuzetnog napretka kvalitete brodskih formi visokih koeficijenata punoće.

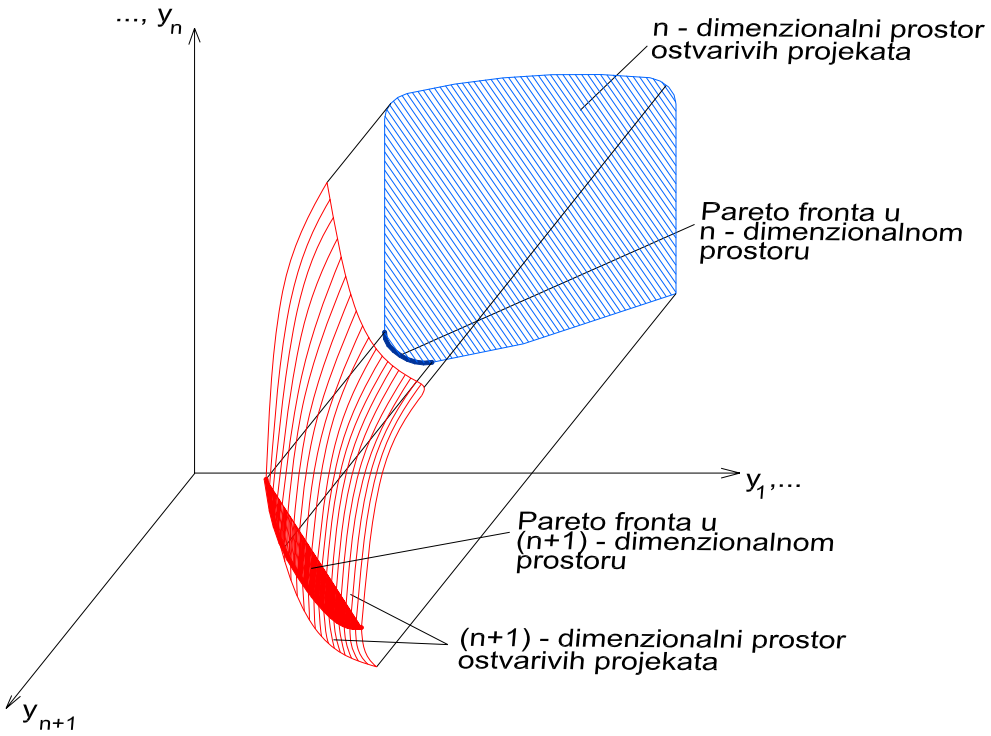
Međutim, u većini slučajeva gdje osnovne izmjere broda nisu striktno ograničene, projekti brodova se ipak, u najvećem broju slučajeva, definiraju na donjim granicama mogućih veličina duljina i širina, te s blok koeficijentima na gornjim ostvarivim granicama. Ova praksa ima uporište u činjenicama da su brodovi manjih glavnih izmjera i većeg koeficijenta punoće jeftiniji u gradnji, da povećani troškovi goriva na takvim brodovima nisu predstavljali značajniji problem zbog niskih cijena nafte i naftnih derivata, te jednostavno, da je takav bio trend u projektiranju brodova.

# 4 OSNOVE NOVE METODOLOGIJE PROJEKTIRANJA TRGOVAČKIH BRODOVA

Nadalje izložena metodologija omogućava donošenje racionalnog izbora optimalnog projekta broda obzirom na atribute vezane uz projektiranje, gradnju i eksploataciju broda, ne ograničavajući se pritom samo na projekte unutar područja „standardnih“ projektnih rješenja.

Osnovna zamisao je da se Pareto fronta nedominiranih optimalnih projekta „proširi“ izvan područja u kojem se nalaze kvalitetni suvremeni brodovi. U prethodnom poglavlju su prikazana osnovna svojstva današnje generacije različitih tipova i veličina brodova, iz čega se može zaključiti da moderna brodogradilišta projektiraju i grade vrlo slične brodove, optimalne ili blizu optimalnih unutar zadanog prostora i projektnog modela. Također se može zaključiti da više nije moguće ostvariti bitna poboljšanja i unapređenja projekta broda u okvirima današnjeg pristupa u kojem brodogradilište vrednuje projekt broda isključivo prema projektnim atributima koji su isključivo vezani za poslovanje brodogradilišta.

Novom metodologijom se u optimizacijski model uključuju i projektni atributi vezani uz eksploataciju broda. To također donosi sa sobom potrebu ispitivanja šireg prostora mogućih projektnih rješenja, budući da se optimalna rješenja više ne moraju nalaziti u uskom području u kojem su dosad bila smještena. Osnovni prikaz nove metodologije je izložen na sljedećoj slici.



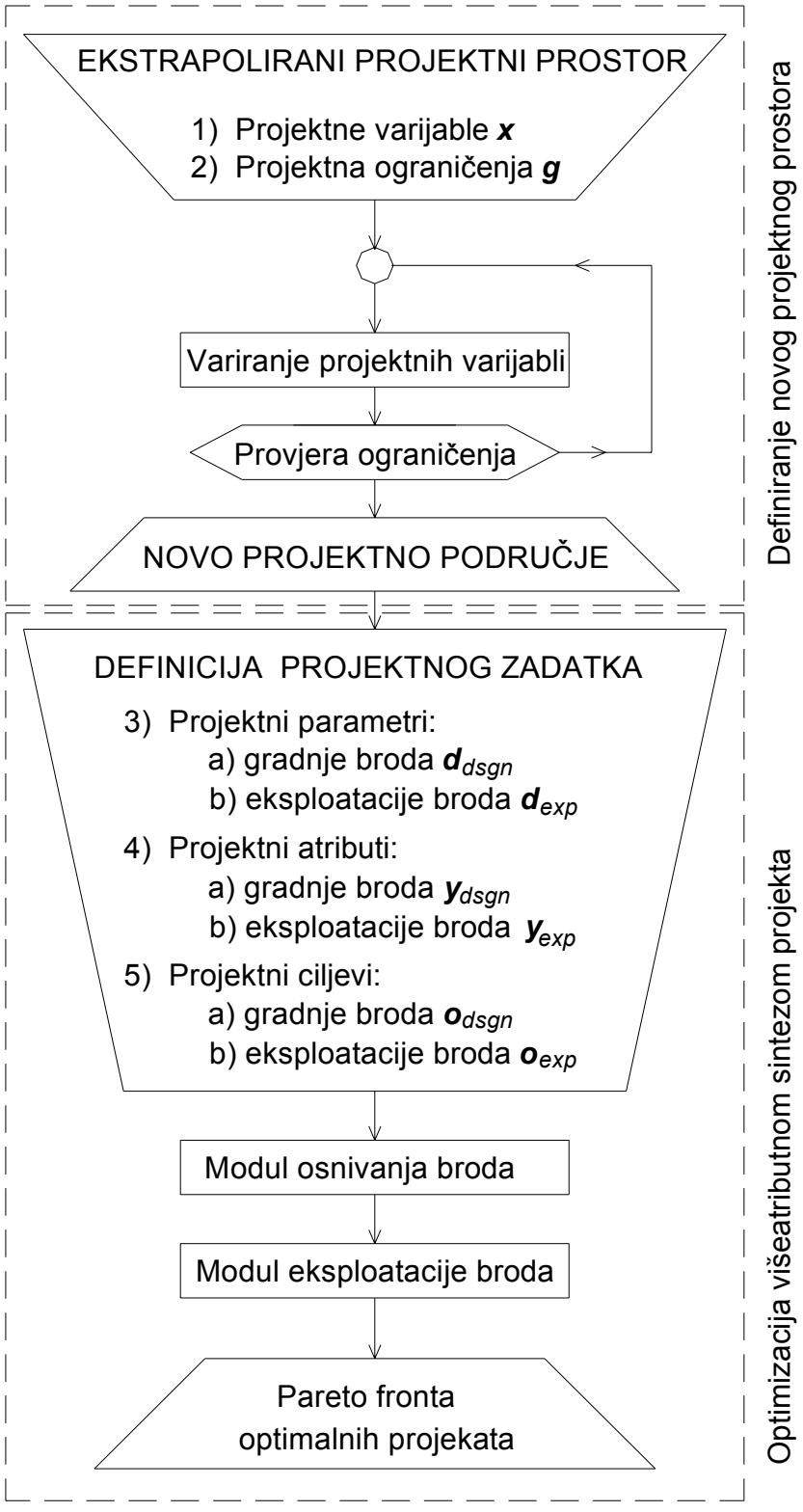

Slika 4 Principijelni prikaz nove metodologije u prostoru atributa

Na prethodnoj slici se može uočiti da je prostor projektnih atributa proširen dodatnom dimenzijom vezanom za atribut koji je proistekao iz eksploatacije broda, u ovom slučaju profit broda. Time je omogućeno proširenje Pareto fronte nedominiranih projekata na projektna područja koja do sada nisu razmatrana, niti su bila uključena u optimizacijske postupke osnivanja broda. Optimalni projekti se mogu pozicionirati unutar proširenog projektnog prostora, što omogućava dosezanje novog nivoa kvalitete optimalnih projekata.

Primjena nove metodologije vodi dopunjavanju projektne procedure osnivanja broda novim elementima:

- Definiranju novog (proširenog) projektnog prostora,
- Uključivanje projektnih parametara, atributa i ciljeva proisteklih iz eksploatacije broda u postupak višeatributne optimizacije projekta.

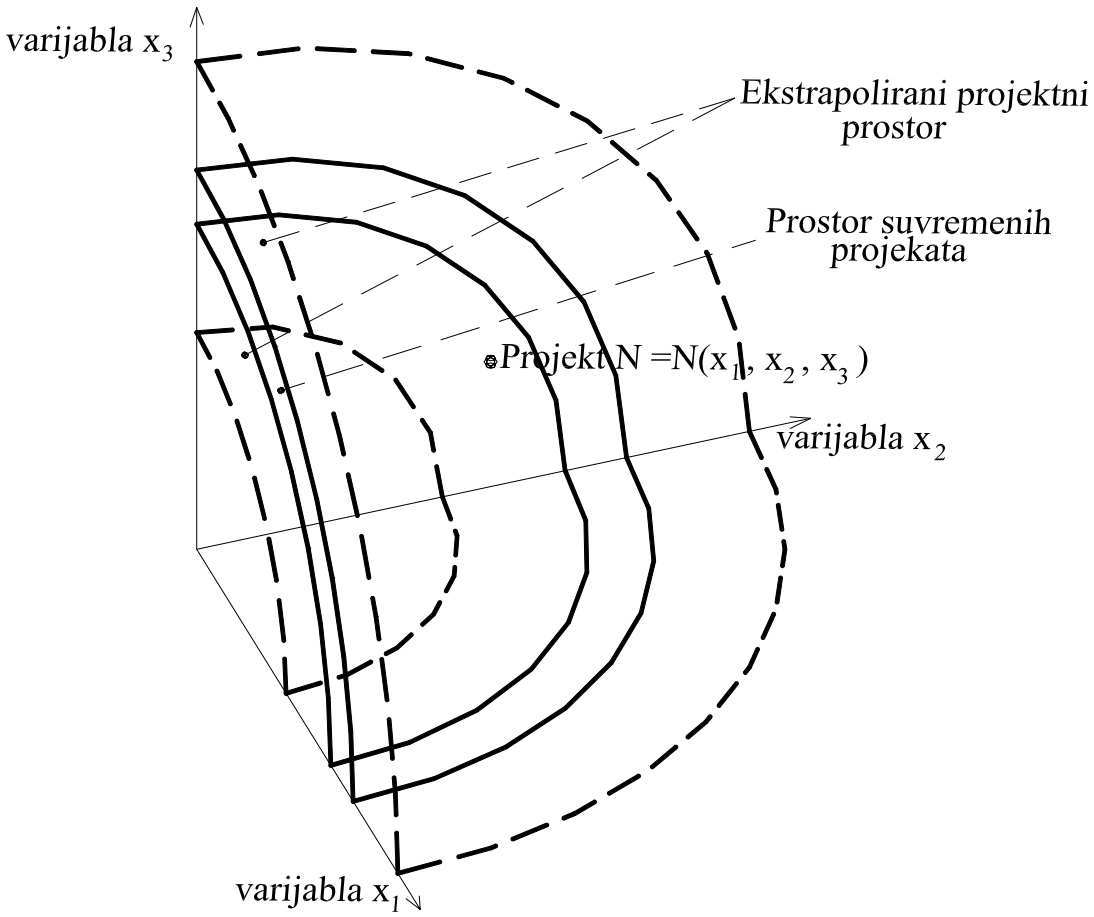
Blok shema nove projektne procedure je prikazana sljedećom slikom.




Slika 5 Blok shema nove projektne procedure

U okviru nove metodologije je nužno ispitati mogućnost ektrapolacije izvan područja suvremenih projekata po svim projektnim varijablama. Rješenja koja ne vode tehnički korektnim projektima se odbacuju, a projekt se pozicionira u novo područje optimalnih projekata te se ispituju njegove komercijalne prednosti u odnosu na kvalitetni standardni projekt.

Ekstrapolacija varijabli izvan područja suvremenih projekata je principijelno prikazana sljedećom slikom.




Slika 6 Ekstrapolacija varijabli izvan područja suvremenih projekata na primjeru 3-d projektnog prostora

Prethodnom slikom je prikazan ukupan prostor projekata koji je razapet projektnim varijablama, odnosno glavnim izmjerama broda. Uski podprostor koje se nalazi u sredini cjelokupnog prikazanog projektnog prostora predstavlja prostor suvremenih projekata u kojem se nalazi većina brodova izgrađenih u kvalitetnim brodogradilištima. Širi prostor koji je ekstrapoliran s donje i s gornje strane predstavlja ukupni prostor u kojem su ekstrapolacije moguće.

Naravno, cijeli taj prostor nije iskoristiv za pozicioniranje ostvarivih projekata, jer su u njemu sadržana i ona područja koja ne zadovoljavaju projektna ograničenja. Zbog toga je potrebno ispitati ostvarivost projekata u ukupnom prostoru prije provedbe samog postupka projektiranja i optimiranja. Prilikom ekstrapolacije svake pojedine projektne varijable izvan područja „standardnih" projekata treba ispitati da li svaka pojedina promjena pada unutar projektnih ograničenja zadanih od stane projektanta [16,17,18], bilo minimalnih i maksimalnih granica svake pojedine varijable,

| varijabla | donja granica | gornja granica |
|---|---|---|
| $x_1$ | $x_{1min}$ | $x_{1max}$ |
| $x_2$ | $x_{2min}$ | $x_{2max}$ |
| $x_3$ | $x_{3min}$ | $x_{3max}$ |
| … | … | … |
| $x_n$ | $x_{nmin}$ | $x_{nmax}$ |

Tablica 1 Ograničenja projektnih varijabli

bilo minimalnih i maksimalnih ograničenja odnosa projektnih varijabli.

| odnos varijabli | donja granica | gornja granica |
|---|---|---|
| $x_1/x_2$ | $(x_1/x_2)_{min}$ | $(x_1/x_2)_{max}$ |
| $x_1/x_3$ | $(x_1/x_3)_{min}$ | $(x_1/x_3)_{max}$ |
| … | … | … |
| $x_1/x_n$ | $(x_1/x_n)_{min}$ | $(x_1/x_n)_{max}$ |
| … | … | … |
| $(x_{n-1})/x_n$ | $[(x_{n-1})/x_n]_{min}$ | $[(x_{n-1})/x_n]_{max}$ |

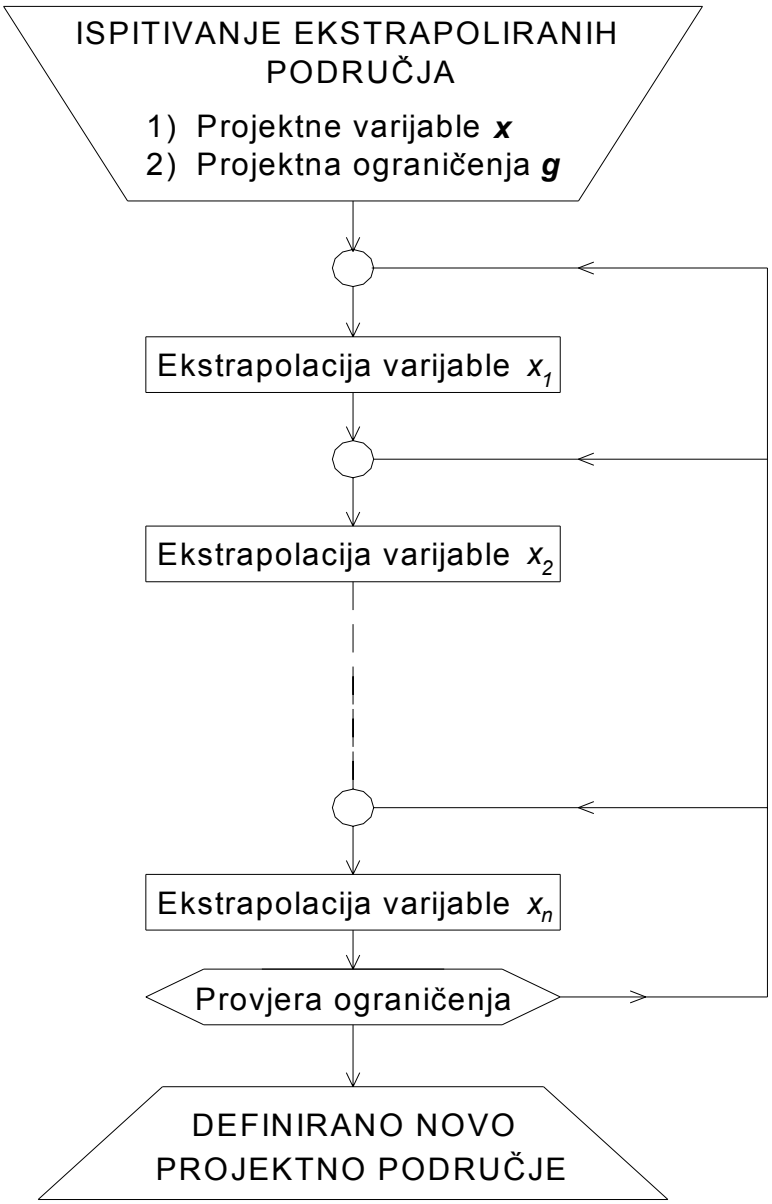
Tablica 2 Ograničenja odnosa projektnih varijabli

U svrhu daljnjeg sužavanja projektnog prostora mogu se uvesti i dodatna ograničenja, primjerice min-max ograničenja očekivanog iznosa pojedinog projektnog svojstva (atributa), što je prikazano sljedećom tablicom.

| atribut | donja granica | gornja granica |
|---|---|---|
| $y_1$ | $y_{1min}$ | $y_{1max}$ |
| $y_2$ | $y_{2min}$ | $y_{2max}$ |
| … | … | … |
| $y_n$ | $y_{nmin}$ | $y_{nmax}$ |

Tablica 3 Ograničenja pojedinih atributa

Provedbom ovog postupka izbjegavamo matematičko modeliranje projekta broda za ona područja u kojima nema ostvarivih projektnih rješenja. Postupak se može jednostavno prikazati narednom slikom.



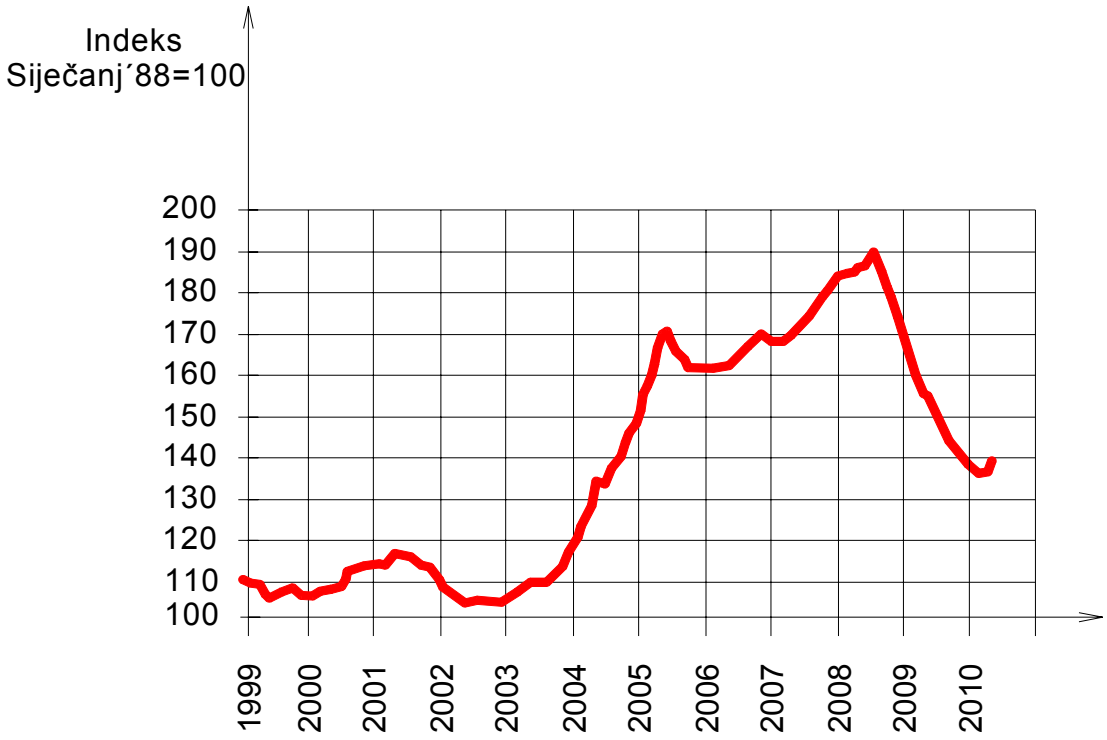

Slika 7 Ispitivanje ostvarivosti projekta u ekstrapoliranim područjima

# 5 OSNOVE EKONOMSKE EKSPLOATACIJE TRGOVAČKOG BRODA

Kvalitetno poslovanje pomorskih kompanija se zasniva na sljedećim osnovnim premisama: povoljnoj nabavci broda, maksimiziranju prihoda od eksploatacije broda, minimiziranju troškova eksploatacije i financiranja broda i povoljnoj prodaji broda nakon perioda eksploatacije. Nabrojeni aspekti poslovanja su međusobno zavisni - u uvjetima visokog pomorskog tržišta potražnja za brodskim prostorom je velika pa se mogu očekivati i visoke cijene novogradnji, odnosno cijene polovnog brodovlja. U tom se slučaju također mogu očekivati viši troškovi operiranja broda nego u vrijeme srednjeg ili niskog tržišta (moguć je porast troška posade, osiguranja, financiranja itd.). Ipak treba imati na umu da aktualno stanje navedenih aspekata poslovanja ne ovisi samo o stanju pomorskog tržišta, već i o cijelom nizu drugih utjecajnih parametara, što analizu i prognozu razvoja svakog pojedinog aspekta čini složenom.

## 5.1 Kretanje cijena novogradnji

Visina cijena novogradnji ovisi o cijelom nizu utjecajnih faktora. Cijene novogradnji slijede sinusoidalni oblik funkcije s napomenom da se u periodu od prije 6-7 godina prosječna cijena popela na vrlo visok i dotad nezabilježen nivo, na što je presudan utjecaj imala povećana potražnja za brodskim prostorom zbog otvaranja kineskog ekonomskog prostora. Perioda sinusoide je, u pravilu, oko četiri godine i može se generalno reći da slijedi, s manjim vremenskim pomakom, sinusoidu pomorskog tržišta. Na stanje brodograđevnog tržišta, osim nivoa pomorskog tržišta, u najvećoj mjeri utječu i cijena čelika (koja nije u značajnijoj mjeri funkcija konzumacije čelika od strane svjetske brodograđevne industrije), cijena obojenih metala, odnos US$ prema košari valuta te otvaranje novih brodograđevnih kapaciteta u zemljama s jeftinijom radnom snagom.




Slika 8 Indeks cijena novogradnji [D1]

Iz gornje slike se može uočiti da su u zadnjih desetak godina zabilježena tri maksimuma i tri minimuma cijena novogradnji. U periodu od 1998. do 2003. godine pojavljuju se dva minimuma i jedan maksimum na dotad uobičajenim nivoima i odnosom maksimuma i minimuma od cca 1.15 (do 1.2) naprama 1. Idući maksimum se pojavljuje u 2005. godini i to na nivou od oko 1.7 u odnosu na referentni nivo. Naredni minimum pada na razinu od oko 1.6 referentnog nivoa, a maksimum koji se pojavljuje u 2008. doseže 1.9 referentnog nivoa. Nakon toga cijene novogradnji ponovno padaju. Trenutno su se stabilizirale na nivou od oko 1.4 referentnog nivoa. Nezahvalno je prognozirati daljnja kretanja brodograđevnog tržišta.

## 5.2 Kretanje pomorskog tržišta i ostvarivanje prihoda

Pomorsko tržište ima karakteristiku sinusoidalne funkcije. Pravilno se izmjenjuju stanja visokog tržišta i stanja niskog tržišta. Ovakvo ponašanje pomorskog tržišta je u devetnaestom stoljeću prvi uočio engleski bankar Overstone te je identificirao sljedeće faze u njegovom ponašanju:

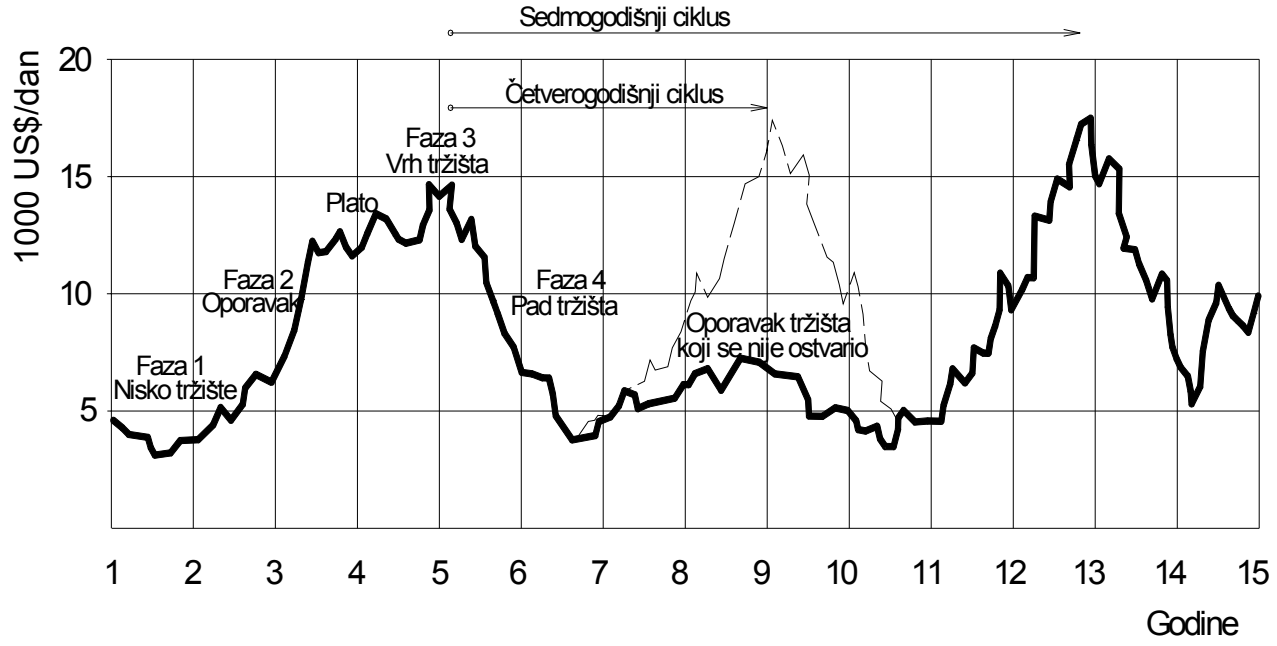
- mirovanje,
- poboljšanje,
- napredovanje,
- vrhunac,

- prekomjerni razvoj,
- nemir,
- pritisak,
- stagnacija i
- iscrpljenost.

Ove se faze mogu uočiti i u ponašanju suvremenog pomorskog tržišta, iako je danas uobičajeno dijeljenje ciklusa na sljedeće četiri faze:

1. nisko tržište,
2. oporavljanje tržišta,
3. visoko tržište,
4. pad tržišta.

Puni ciklus obično traje oko četiri godine. Povremeno se dogode anomalije, kao npr.: tržište se ne oporavi dovoljno da bi doseglo visoko stanje, ili se ciklus produži na dulji period od uobičajenog (kao što je to nedavno bio slučaj), ili se prosječni nivo tržišta premjesti na višu ili nižu razinu (slučaj koji se također nedavno dogodio). Neke od ovih situacija su prikazani sljedećom slikom koja je tipična za ponašanje pomorskog tržišta [21].




Slika 9 Tipično ponašanje pomorskog tržišta [21]

Za situaciju niskog tržišta je tipično:

- vozarine su na nivou operativnih troškova,
- cijene polovnog brodovlja se približavaju njihovoj cijeni u rezalištima,
- ugovara se malo novogradnji,
- velik broj starijih brodova se proda rezalištima,
- teško se dolazi do bankovnih kredita,
- razmišljanja o tržištu su pesimistična.

Situaciju visokog tržišta karakterizira:

- vozarine su barem tri puta više od operativnih troškova,
- cijene polovnog brodovlja starog pet godina su na nivou cijena novogradnji,
- ugovara se veliki broj novogradnji,
- vrlo malo brodova završava u rezalištu,
- lako se dolazi do povoljnih kredita,
- razmišljanja o tržištu su izuzetno pozitivna.

Brod može ostvarivati prihode od pomorskog prijevoza dobara na sljedeća tri osnovna načina [21,24]:

- brodarskim ugovorom za putovanje,
- brodarskim ugovorom na vrijeme,
- ugovorom o zakupu.

Brodarski ugovor za putovanje se sklapa između brodara i naručitelja i njime se brodar obvezuje da će prevesti ugovoreni teret u jednom ili više unaprijed određenih putovanja. Ugovor prestaje kada se obavi ugovoreno putovanje. Vozarina se najčešće određuje prema količini prevezenog tereta, a u ponekim slučajevima kao paušalni iznos. Kod ovog ugovora brodar obično snosi sve troškove osim troškova prekrcaja tereta te je odgovoran za planiranje i provedbu putovanja.

Brodarski ugovor na vrijeme je ugovor o prijevozu stvari morem kojim se brodar obvezuje da će u ugovorenom vremenu i ugovorenim brodom obavljati prijevoze za naručitelja. Naručitelj je za to vrijeme obvezan plaćati ugovorenu vozarinu. Ovakvi ugovori se odnose na cijeli brod pa brodaru nije dopušteno koristiti mogući višak brodskog prostora na pojedinom putovanju za prijevoz nekih drugih tereta. U ovom slučaju naručitelj snosi troškove goriva, maziva, lučkih taksi, pristojbi kanala i plovnih putova te ostale troškove vezane za teret. Troškove vezane za posadu i tekuće održavanje snosi brodar.

Ugovorom o zakupu zakupodavatelj daje zakupniku brod na uporabu uz plaćanje zakupnine. U ovom slučaju zakupnik posluje s brodom za svoj račun kao da je vlasnik broda te u potpunosti snosi odgovornost za troškove eksploatacije broda i rizike poslovanja.

## 5.3 Troškovi eksploatacije broda i financiranja

Minimiziranje troškova eksploatacije i financiranja je jedan od preduvjeta uspješnog poslovanja broda i pomorske kompanije. Troškovi se sastoje od troškova operiranja broda (troškovi posade, zaliha, tekućeg održavanja, osiguranja i opći troškovi), troškova periodičnog održavanja broda (troškovi dokovanja, pregleda i popravaka), troškova putovanja (troškovi goriva, lučkih pristojbi, remorkera, pilota i takse kanala i plovnih putova), troškova prekrcaja tereta (troškovi ukrcaja/iskrcaja i oštećenja tereta) i troškovi kapitala (otplata investicijskog troška, kamate i dividende).

Minimiziranje troškova operiranja broda može se provoditi na više načina. Troškove posade je moguće smanjiti povećanjem stupnja automatizacije brodske opreme, odnosno smanjenjem članova posade. Ovaj je trend bio jako izražen pred 20-tak godina, pa su pojedini tipovi brodova (prvenstveno brodovi za prijevoz container-a) operirali svega s 7-8 članova posade. Eksploatacija brodova s malobrojnom posadom je dovela do povećanih problema s tekućim održavanjem brodova i brodske opreme, odnosno do povećanja troškova po toj osnovi te do potrebe za češćim izmjenama posade. Stoga je ova praksa ekstremno malog broja posade napuštena, pa je danas uobičajeno da na većim teretnim brodovima posada broji 20 do 25 članova. Kod pomorskih kompanija koje ulažu posebnu pažnju u školovanje vlastitog pomorskog kadra posada može brojiti čak i 30 ili više članova.

Također je moguće postići uštedu na troškovima posade ukrcavanjem jeftinije (manje kvalitetne) posade, no to je politika koja dugoročno ne može dati povoljan rezultat. Slično vrijedi i za štednju na tekućem održavanju, jer ni to ne može donijeti uspjeh u duljem vremenskom periodu. Troškovi zaliha se mogu smatrati konstantnim.

U općim troškovima dominiraju troškovi operative pomorske kompanije. Suvremeno organizirane pomorske kompanije operiraju s malim brojem stalno zaposlenog osoblja i značajnim udjelom angažmana vanjskih firmi specijaliziranih za pojedine aktivnosti vezane uz operiranje brodova, pa su mogućnosti ušteda na ovom području vrlo ograničeni.

Pomorska kompanija može utjecati na smanjenje troškova osiguranja prvenstveno kroz kvalitetno i sigurno operiranje brodova, čime postiže bolji bonitet kompanije i niže premije (troškove) osiguranja.

Kod troškova periodičnog održavanja broda je značajno napomenuti da kvalitetna posada može svojom stručnošću i angažmanom bitno utjecati na prevenciju kvarova i smanjenje ovih troškova. Naravno, to može imati za posljedicu povećanje troška posade. Također treba istaknuti da je intenzivni razvoj tehnologija koje se odnose na antikorozivnu zaštitu broda kao i razvoj antivegetativnih premaza za oplakani dio brodske oplate doveo do situacije da se redovno dokovanje broda može izvoditi u duljim vremenskim periodima umjesto dosad uobičajenog perioda od 2.5-3 godine.

Većina komponenti troškova putovanja je fiksna (lučke pristojbe, piloti i takse kanala i plovnih putova). Troškovi remorkera se u pojedinim lukama mogu izbjeći ako brod ima

kvalitetne manevarske mogućnosti te mu nije potrebna asistencija remorkera. Kod teretnih brodova to se prvenstveno odnosi na instalaciju pramčanog propelera. U tom slučaju treba voditi računa da je smanjenje ovih troškova plaćeno povećanjem otpora broda i troškova vezanih uz povećanu potrošnju goriva.

U ovoj grupi troškova je najznačajnija stavka trošak goriva. Smanjenje potrošnje goriva se može postići na nekoliko načina:

- plovidbom nižom brzinom – moguće provesti samo u rijetkim situacijama, jer je vrijeme dolaska i odlaska u luke ukrcaja/iskrcaja najčešće čvrsto fiksirano,
- operiranjem novog brodovlja s porivnim strojevima nove generacije i nižom specifičnom potrošnjom goriva,
- redovnim dokovanjem i apliciranjem suvremenih antivegetativnih premaza, čime se sprječava porast otpora broda,
- povremenim čišćenjem propelera između dva dokovanja (obično uz angažman ronilaca),
- projektiranjem i izgradnjom broda s nižim otporom, odnosno potrošnjom goriva.

Posljednji od nabrojenih načina ima najveći potencijal i u ovom radu mu je posvećena posebna pažnja.

Troškovi prekrcaja tereta se mogu minimizirati instalacijom kvalitetne opreme i pažljivim rukovanjem čime se smanjuje oštećivanje tereta.

Troškovi kapitala ovise o stanju na pomorskom i financijskom tržištu. Pomorska kompanija može postići bolje uvjete financiranja vlastitim stabilnim i kvalitetnim poslovanjem.

## 5.4 Kretanje cijena polovnog brodovlja i otpadnog čelika

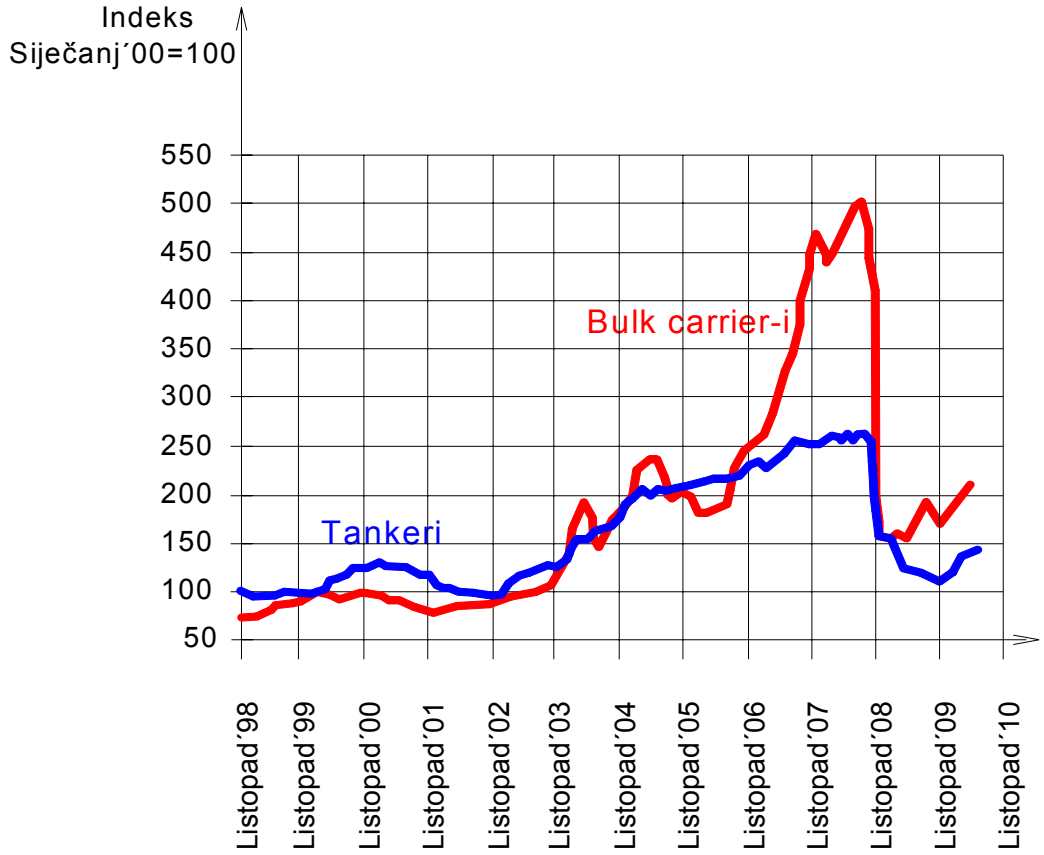
Na kraju eksploatacije broda pomorska kompanija prodaje brod. Novac dobiven od prodaje broda može služiti za zatvaranje postojećih kreditnih linija ili se pojavljuje kao profit koji se dalje investira. U slučaju lošeg poslovanja može služiti i za podmirenje jednog dijela ili ukupnog dugovanja.

U ovisnosti o općem stanju i starosti broda, o stanju pomorskog tržišta i o cijeni otpadnog čelika brod se može prodati drugoj pomorskoj kompaniji za daljnju eksploataciju ili kao otpadni čelik u rezalište. Odluka ovisi o tome da li je moguće brod prodati za daljnju eksploataciju ili ne.

Tržište polovnih brodova zavisi o stanju pomorskog tržišta i očekivanju razvoja situacije u bližoj budućnosti. Za razliku od tržišta novogradnji gdje se na isporuku novogradnje treba čekati od jedne do oko tri godine od trenutka ugovaranje, na tržištu polovnog brodovlja je moguće obaviti kupoprodaju broda u vrlo kratkom roku. Na taj način se može brzo reagirati na nove mogućnosti zaposlenja brodskog prostora na pomorskom tržištu. Ovo svojstvo tržišta polovnih brodova može dovesti do, na prvi pogled, apsurdne

situacije da polovni brod postigne jednaku ili čak višu cijenu od novogradnje. Naravno, ovakva situacija je moguća samo u uvjetima visokog pomorskog tržišta.

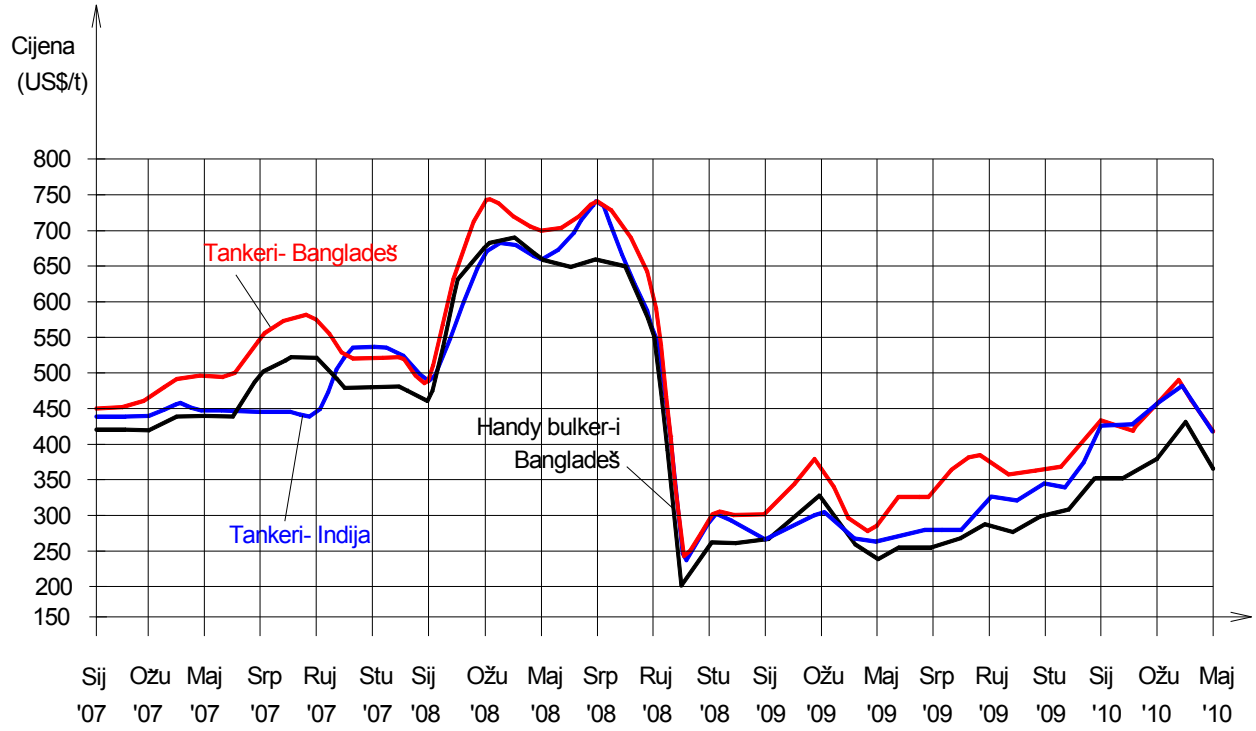
U posljednjem desetljeću cijene polovnog brodovlja su uobičajeno varirale po sinusoidi, a tijekom 2003. godine srednja se vrijednost sinusoide podigla na bitno viši nivo, slično kao što se dogodilo i na tržištu novogradnji. Također je karakteristično da su cijene polovnih bulk carrier-a tijekom 2007. i 2008. dosegle izuzetne visine, prvenstveno zbog jakog porasta uvoza sirovina u Kinu. Narednom slikom je prikazano kretanje cijena polovnih tankera i bulk carrier-a u posljednjih desetak godina.




Slika 10 Indeks cijena polovnih tankera i bulk carrier-a [D1]

Stariji polovni brodovi (u pravilu stariji od 20 godina) u najvećem broju slučajeva završe u rezalištu jer cijena njihovog održavanja poraste do neekonomičnih visina. Drugi veliki razlog njihove neekonomičnosti je zastarjeli porivni stroj koji uzrokuje veću potrošnju goriva, pa time i veće troškove goriva nego što je to slučaj kod novijih brodova. Vrijednost broda kao otpadnog čelika ovisi o stanju tržišta čelika. Brodograđevni čelik je vrlo kvalitetna sirovina za proizvodnju novih čeličnih proizvoda, pa se stoga sav čelični materijal izrezanog broda može reciklirati.

Prošlih je godina potražnja za čeličnim poluproizvodima dosegla vrlo visok nivo (prvenstveno zbog velikih investicija u Kini), pa se to odrazilo i na cijene otpadnog čelika. Tijekom 2008. godine tona otpadnog čelika je dosegla cijenu od čak 750 US$. Krajem 2008. godine tržište je strmoglavo palo te se stabiliziralo na nivou od 300-400 US$/t. Stanje tržišta otpadnog čelika tijekom zadnje tri godine prikazano je sljedećom slikom.




Slika 11 Kretanje cijena otpadnog čelika [D1]

# 6 UTJECAJ VANJSKIH PARAMETARA NA PROJEKT I EKSPLOATACIJU TRGOVAČKOG BRODA

Trgovački brod je izložen značajnim utjecajima raznih vanjskih parametara koji utječu na projekt, gradnju i cijenu broda, te na rezultate poslovanja broda u eksploataciji. Uredno provođenje postupka projektiranja broda podrazumijeva optimiranje projekta obzirom na više projektnih svojstava među kojima su i oni na koje vanjski parametri imaju dominantan utjecaj.

Ugovorna cijena novogradnje je u najvećem broju slučajeva definirana u US$ (rjeđe u drugim valutama ili u kombinaciji valuta s najvećim udjelom US$). Dok su prihodi na novogradnji isključivo ili pretežno dolarski, rashodi su pretežno u ostalim valutama (troškovi procesa su u kunama, odnosno u eurima obzirom na čvrstu vezanost kune za euro, troškovi materijala su pretežno u kunama i eurima, troškovi financiranja su u kunama, eurima ili dolarima, itd.). Zbog toga fluktuacija US$ prema košari valuta ima izuzetan utjecaj na cijenu koštanja izgradnje broda. Pri tome treba napomenuti da brodogradilišta nemaju na raspolaganju kvalitetne mehanizme za zaštitu od negativnih posljedica variranja ovog vanjskog parametra.

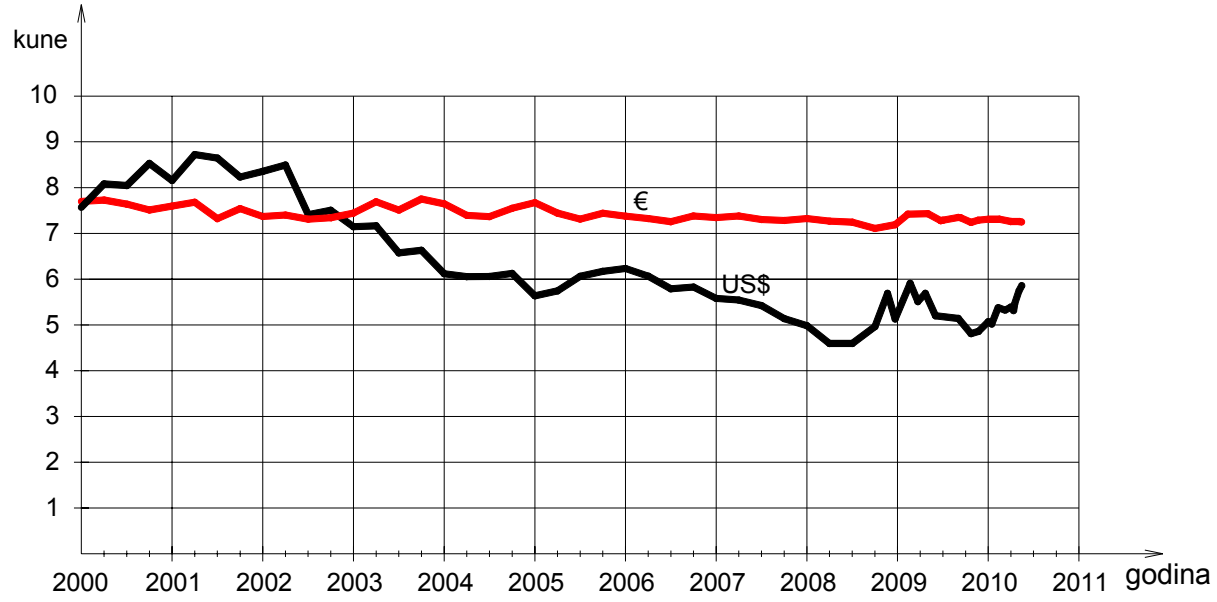
Drugi značajan vanjski parametar koji utječe na cijenu koštanja izgradnje broda, a preko toga i na projekt je cijena čelika. Trošak nabave čelika sudjeluje s 20-30% u cijeni materijala potrebnog za izgradnju broda, pa je potpuno razumljivo da promjena cijene čelika može značajno utjecati na cijenu novogradnje i rezultat poslovanja na njoj. Ako se pri tome podsjetimo da se cijena čelika tijekom zadnjih godina učetverostručila, možemo dobiti utisak o značaju ovog parametra.

Naredni značajan vanjski parametar koji utječe na projekt broda i njegove rezultate poslovanja je cijena pogonskog goriva. Gorivo je dominantan trošak u eksploataciji broda. Nažalost, postojeća praksa pokazuje da pomorske mogu utjecati na visinu troška goriva samo u zanemarivo maloj mjeri. Najkvalitetniji utjecaj na smanjenje troška goriva je putem smanjenja brzine broda, no ovo se rješenje može primijeniti vrlo rijetko, jer u većini slučajeva brodovi imaju vrlo precizno definirana vremena ukrcaja i iskrcaja tereta, kao i vrijeme plovidbe između dviju luka. Zbog toga je nužno ovom problemu posvetiti dužnu pažnju već tijekom optimiranja projekta broda.

## 6.1 Fluktuacija US$

Ovaj parametar dominantno utječe na rezultate poslovanja brodogradilišta na pojedinoj novogradnji. Vrijeme izgradnje broda se kreće od 8-9 mjeseci do 2-2.5 godine, ovisno o njihovoj složenosti i tehnološkom nivou brodogradilišta. Brodogradilišta također rado popunjavanju knjigu narudžbi za dulji period (3-4 godine unaprijed) jer time osiguravaju kontinuitet zaposlenosti i stabilnost poslovanja. U drugu ruku, ovo ima za posljedicu veće izlaganje brodogradilišta riziku od pada vrijednosti US$. Upravo takva situacija se odigrala tijekom posljednjih nekoliko godina te je dovela sva brodogradilišta u vrlo neugodan položaj i financijske probleme. Za ilustraciju osjetljivosti projekta broda i

komercijalnih efekata gradnje broda dovoljno je pogledati donju sliku koja prikazuje odnos US$ i € prema kuni od 2000. godine do danas.




Slika 12 Tečaj US$ i € prema kuni od 2000. godine do danas [D2]

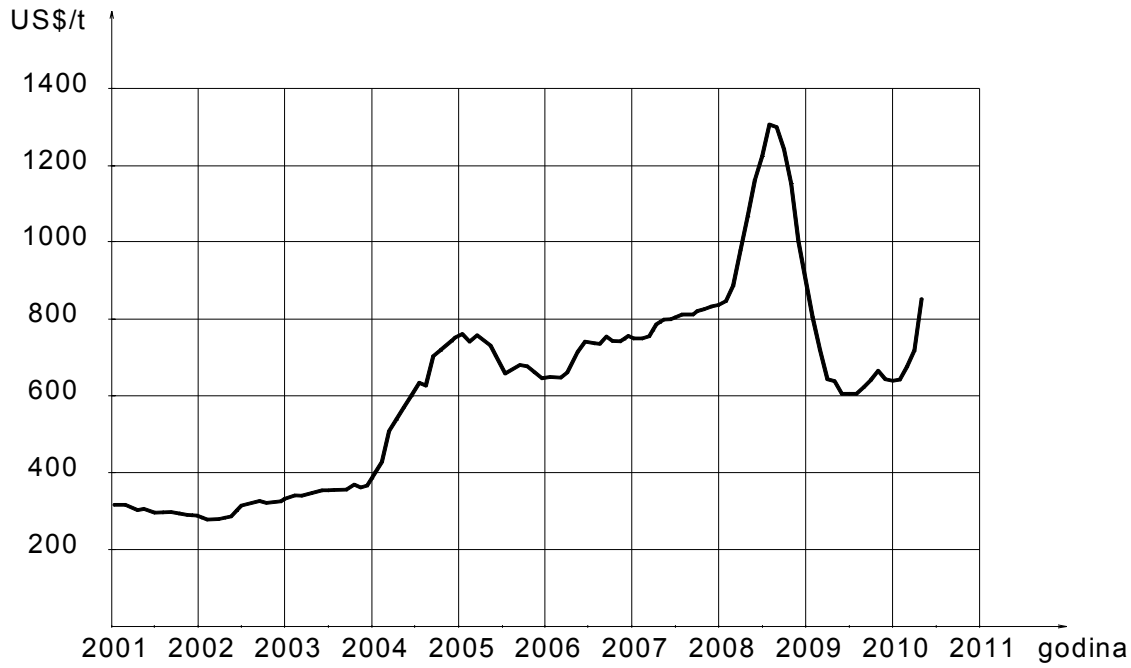
Iz slike se može uočiti da je od 2000. godine US$ varirao od maksimalnih skoro 9 do minimalnih 4.5 kuna za jedan US$, odnosno od cca 1.2 do 0.6 € za jedan US$. Ako za primjer uzmemo slučaj ugovaranja novogradnje u prvom kvartalu 2002. godine s rokom isporuke u zadnjem kvartalu 2004. godine, možemo ustanoviti da je cijena broda umanjena padom US$ za čak jednu trećinu. Drugi drastičan primjer ovakve fluktuacije US$ bi bila novogradnja ugovorena početkom 2006. godine s rokom isporuke sredinom 2008. godine u kojem je slučaju cijena broda umanjena jednu četvrtinu.

## 6.2 Cijena brodograđevnog čelika

Kod većine tipova i veličina brodova čelična konstrukcija predstavlja najveću pojedinačnu stavku u cijeni gradnje broda. Ona utječe na iznos dviju najvećih troškovnih grupa: materijala i procesa (rada). Izrada brodske konstrukcije predstavlja, u najvećem broju slučajeva, 30 do 60% ukupnog troška rada, pa se minimiziranjem volumena broda i mase čelične konstrukcije postižu značajne uštede u procesu. Po pitanju troška vezanog uz nabavu materijala potrebnog za gradnju broda brodograđevni čelik je daleko najznačajnija pojedinačna stavka. Kod jednostavnijih brodova (prvenstveno velikih bulk carrier-a) čelik je zadnjih godina dosegao polovinu ukupne cijene koštanja materijala. Na manjim brodovima je utjecaj čelika na cijenu materijala nešto manji, ali ni na složenim brodovima njegov dio u ukupnom trošku materijala ne pada ispod 20 do 25%.

Stoga je potpuno razumljivo da su brodogradilišta izuzetno osjetljiva na kretanje cijene brodograđevnog čelika te da tom problemu posvećuju izuzetnu pažnju. Dodatni poticaj

ovakvom stavu brodogradilišta je dalo kretanje cijene brodograđevnog čelika na svjetskom tržištu tijekom posljednjih godina. Iz naredne slike se može uočiti da se cijena brodograđevnog lima dugo vremena zadržavala na nivou od 300-350 US$ po toni, da bi od početka 2004. godine počela naglo rasti dosegnuvši tijekom 2008. godine dotad nezabilježene visine od oko 1300 US$ po toni. Naredna slika prikazuje kretanje cijene brodograđevnog čeličnog lima od 2001. godine.




Slika 13 Kretanje cijene brodograđevnog čeličnog lima
od 2001. godine do danas - svjetsko tržište [D3]

Iz slike se može vidjeti da se cijena brodograđevnog čelika udvostručila u vrlo kratkom periodu od početka 2004. godine do početka 2005. godina kad je sa dugogodišnjeg nivoa od 300-350 US$ po toni skočila na preko 700 US$ po toni. Cijena se na toj razini zadržala tijekom iduće dvije godine, no od početka 2007. godine ponovno počinje vrtoglavo rasti te sredinom 2008. doseže dotad nezabilježen maksimum od oko 1300 US$ po toni. Od tada se cijena čelika smiruje i pada na iznose ispod 1000 US$ po toni.

Utjecaj ovog kretanja cijene čelika na trošak gradnje broda se može ilustrirati jednostavnim primjerima: na Suezmax tankeru ugovorenom krajem 2007. godine po tadašnjoj cijeni od 90 milijuna US$ i s kalkuliranom jediničnom cijenom čelika od oko 830 US$ po toni tijekom gradnje je porasla cijena čelika na oko 1300 US$ po toni, što je brodogradilište dovelo u situaciju da pretrpi štetu od cca 10 milijuna US$ samo po osnovi promjene cijene čelika.

Kao drugi primjer može poslužiti Aframax tanker ugovoren početkom 2004. godine po tadašnjoj cijeni od 42 milijuna US$ i s kalkuliranom jediničnom cijenom čelika od oko 390 US$ po toni. Tijekom gradnje cijena čelika je porasla na oko 760 US$ po toni, što je uzrokovalo dodatni trošak od cca 6 milijuna US$, odnosno 15% ugovorene cijene novogradnje.

Izloženi primjeri zorno pokazuju koliko je značajan utjecaj cijene brodograđevnog čelika na cijenu gradnje broda i poslovni rezultat brodogradilišta. Stoga je potpuno opravdan i razumljiv interes brodogradilišta da se projektom broda pokušaju minimalizirati mogući negativni utjecaji fluktuacije cijene čelika na rezultate poslovanja na pojedinim novogradnjama.

## 6.3 Cijena pogonskog goriva

U trošku operiranja trgovačkog broda najznačajniju stavku predstavlja trošak pogonskog goriva. Trošak goriva ovisi o trima ulaznim parametrima: kvaliteti, jediničnoj cijeni i potrošnji goriva.

Po pitanju kvalitete goriva treba istaknuti osnovnu činjenicu: današnja generacija sporohodnih dvotaktnih porivnih diesel motora i četverotaktnih srednjehodnih pomoćnih brodskih motora može se bez problema pogoniti najtežim (najnekvalitetnijim i najjeftinijim) pogonskim gorivima viskoziteta do 720 cSt pri 50$^{o}$C. Naravno, pri tome treba napomenuti da je na današnjim trgovačkim brodovima nužna instalacija vrlo složenog sustava za pripremu takvog goriva i njegovo dovođenje u stanje da se može bez problema koristiti u diesel motorima.

Potrošnja goriva se obično izražava u obliku dnevne potrošnje goriva. Ona se odnosi na količinu goriva koju u toku jednog dana potroše porivni stroj kod plovidbe tzv. trajnom snagom porivnog stroja u službi (CSR), te s dodatkom potrošnje diesel-generatora i kotlovskog postrojenja. U režimu plovidbe otvorenim morem porivni stroj potroši 90 do 95% ukupne potrošnje goriva, pa je stoga najinteresantniji u smislu uštede goriva.

Potrošnja diesel-generatora se može smatrati konstantnom jer u plovidbi pokriva elektropotrošače koji održavaju osnovne brodske funkcije i funkcije vezane uz smještaj posade (pomoćni sustavi, navigacija, klimatizacija, ventilacija itd.). Kotlovsko postrojenje se obično sastoji od utilizacijskog kotla koji koristi toplinsku energiju ispušnih plinova diesel motora i od glavnog kotla (grijanog teškim gorivom). Utilizacijski kotao uglavnom pokriva sve potrošače osim grijanja tereta (kod tankera) koje energetski pokriva glavni kotao. Česta je i instalacija tzv. kompozitnog kotla koji sadrži dvije sekcije: jednu utilizacijsku, a drugu grijanu gorivom. Potrošnja kotlovskog postrojenja se također može smatrati konstantnom.

Cijena goriva ovisi o mnogim utjecajnim faktorima (političkim, ekonomskim, klimatskim itd.) na koje pomorske kompanije nemaju značajnog utjecaja. Ono što nas u okviru ovog rada zanima je kretanje cijene goriva, njegova fluktuacija tijekom posljednjih godina, moguće kretanje u bližoj budućnosti i utjecaj cijene goriva na optimiranje projekta broda.

Tijekom zadnjih pet godina cijena pogonskog goriva se povećala sa višegodišnje konstantne razine na višestruko viši nivo, da bi u zadnjem kvartalu 2008. godine počela naglo padati te se vratila na uobičajenu razinu. Ova situacije je ilustrirana narednom slikom.




Slika 14 Kretanje cijene teškog goriva (Roterdam, 380 cSt)
od 2004. godine do danas [D1]

Iz slike se može vidjeti da je teško gorivo (primjer goriva 380 cSt na roterdamskom bunkeru) od početka 2005. godine do sredine 2006. godine poskupilo za preko dva puta (s 120 do 180 US$ po toni na preko 300 US$ po toni). Nakratko se tržište smirilo, no već početkom 2007. godine cijena ponovno počinje naglo rasti, da bi sredinom 2008. godine dosegla najviši iznos preko 700 US$ po toni. Nakon toga cijena goriva ponovo pada i vraća se na nivo od 200-tinjak US$ po toni. U posljednjem se periodu cijena goriva stabilizirala na nivou od oko 450 US$ po toni.

Utjecaj ovakvih kretanja cijene goriva na poslovanje broda i posljedično na projekt broda može se ilustrirati sljedećim primjerom. Handymax bulk carrier ima dnevnu potrošnju goriva od oko 30 t, pa se dnevni trošak goriva kretao od 4000 do 5000 US$ tijekom 2005. godine do rekordnih 20000 US$ sredinom 2008. godine. Na godišnjem nivou s 250 dana plovidbe trošak goriva u prvom slučaju iznosi 1 do 1.25 milijuna US$, a u drugom 5 milijuna US$. Ovi iznosi izravno upućuju na nužnost promjene filozofije optimiranja projekta broda i uključivanje troška pogonskog goriva među atribute u odnosu na koje se brod optimira.

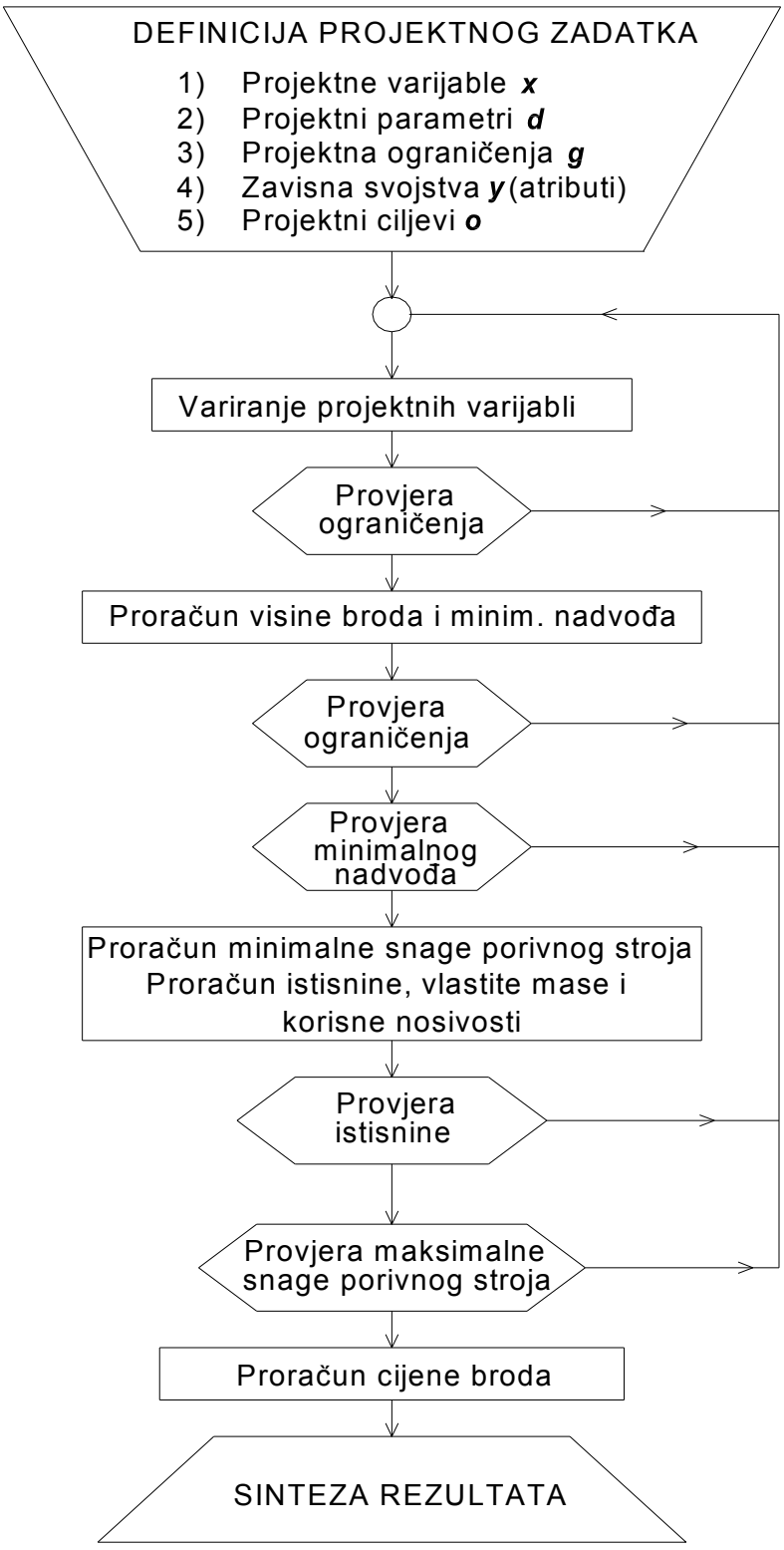
# 7 OPĆA PROJEKTNA PROCEDURA OSNIVANJA TRGOVAČKOG BRODA

## 7.1 Opća projektna procedura

Iz kratkog pregleda osnovnih svojstava projekta i tipova trgovačkih brodova izloženog u Poglavlju 3, može se zaključiti da nije moguće razviti univerzalni model i projektnu proceduru za osnivanje svih tipova trgovačkih brodova. Izložena projektna procedura i pripadni matematički model pokrivaju osnivanje najvećeg broja trgovačkih brodova. Direktno su primjenjivi kod osnivanja tankera i bulk-carrier-a, a mogu se koristiti, uz određene prilagodbe, i za osnivanje preostalih tipova trgovačkih brodova.

Nadalje izložena procedura je temelj za provedbu optimizacije projekta trgovačkih brodova s aspekta projektnih svojstava koja proizlaze iz pristupa projektu sa strane brodogradilišta. Ovom procedurom nisu obuhvaćena ona projektna svojstva i pripadni matematički model koji proizlaze iz eksploatacije broda. Stoga se prikazanu opću projektnu proceduru može smatrati samo jednim od sastavnih dijelova nove metodologije projektiranja trgovačkih brodova koja je osnova za izradu matematičkog modula osnivanja broda (prikazanog na Slici 4).

Opća projektna procedura je objavljena u [16,17,18], a razvijena je na temelju ranijih projektnih modela objavljenih u [4,5,6,7,8,9,10,11] i prikazana je sljedećom slikom.




Slika 15 Blok shema opće projektne procedure

Projektna procedura se može podijeliti na sljedeće osnovne korake:

1. Definiranje projektnog zadatka: projektne varijable, projektni parametri, projektna ograničenja, zavisna projektna svojstva (atributi) i projektni ciljevi,
2. Variranje projektnih varijabli i provjera ograničenja,
3. Proračun i provjera visine broda i minimalnog nadvođa,
4. Proračun minimalne snage porivnog stroja,
5. Proračun istisnine, vlastite mase i ukupne nosivosti,
6. Provjera istisnine,
7. Provjera snage porivnog stroja,
8. Proračun cijene novogradnje,
9. Analiza dobivenih rezultata.

### 7.1.1 Definicija projektnog zadatka

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

1) Projektne varijable

Projektne varijable se dijele na sljedeće osnovne skupine:

a) Osnovne izmjere broda:

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

b) Osnovne karakteristike broda:

- volumen teretnog prostora $V_{car}$ ($m^3$),
- brzina broda $v_{tr}$ (čv).

Prethodno navedene projektne varijable su definirane unutar područja koje je ograničeno njihovim minimalnim i maksimalnim vrijednostima.

c) Identifikator porivnog stroja $I_{me\,i}$.

2) Projektni parametri

Projektni parametri se sastoje od sljedećih skupina:

a) Karakteristike broda koje proizlaze iz projektnog zahtjeva. U pravilu su to garantirana svojstva broda, koja ispunjavamo unutar nekih granica:

- zahtijevana ukupna nosivost $DW_{req}$ (t),
- zahtijevani volumen teretnog prostora $V_{car\ req}$ ($m^3$),
- zahtijevana brzina $v_{tr\ req}$ (čv).

b) Ostali projektni parametri koji su potrebni za provedbu proračuna:

- "specifična voluminoznost broda" $\kappa = \frac{V_{car}}{L_{pp}BD}$ (-),
- procijenjeni utjecaj upotrebe čelika povišene čvrstoće na smanjenje mase čelične konstrukcije $f_1$ (%),
- maksimalna snaga pojedinih porivnih strojeva $MCR_i$ (kW),
- podaci potrebni za izračun cijene materijala: cijene porivnih strojeva $C_{me\ i}$ (€), prosječna jedinična cijena čelika $c_{st}$ (US$/t), odnos bruto/neto mase čelika $c_{gwst}$ (-), cijena preostalog materijala i opreme $C_{res}$ (€),
- podaci potrebni za izračun cijene rada: proizvodnost brodogradilišta $P_{cGT}$ (rs/cGT), jedinična satnica $v_{lab}$ (€/rs), fiksni preostali troškovi $C_{pt\ fix}$ (€), udio varijabilnih preostalih troškova u cijeni novogradnje $c_{var}$ (%),
- odnos €/US$ $ER$ (-).

3) 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: $C_{B\ min}$, $C_{B\ max}$,
- ograničenja volumena teretnog prostora $V_{car\ min}$, $V_{car\ max}$.
- ograničenja brzine broda $v_{tr\ min}$, $v_{tr\ max}$.

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: $(L_{pp}/D)_{min}$, $(L_{pp}/D)_{max}$.

4) Zavisna projektna svojstva (atributi)

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

- masa čelične konstrukcije $W_{st}$ (t),
- snaga porivnog stroja $CSR$ (kW),
- cijena materijala $C_{mat}$ (US$),
- cijena rada (procesa) $C_{lab}$ (US$),
- cijena broda $C_{nb}$ (US$),
- postignuta ukupna nosivost $DW_{ach}$ (t),
- postignuti volumen teretnog prostora $V_{car\ ach}$ ($m^3$),
- postignuta brzina $v_{tr\ ach}$ (čv).

5) Projektni ciljevi

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

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

U pojedinim se slučajevima mogu definirati i drugi projektni ciljevi koji su specifični za pojedine projekte i tipove brodova, kao što su npr.:

- minimiziranje vlastite mase broda,
- maksimiziranje stabiliteta,
- maksimizirane brzine (uz zadanu snagu porivnog stroja), itd.

Kvaliteta projektnog rješenja se procjenjuje kvalitetom ispunjenja pojedinih projektnih ciljeva ili projektnih 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) [4,5,6,11], 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 [12,13,14,15,16,17,18,22,23,25].

### 7.1.2 Variranje projektnih varijabli i provjera ograničenja

Projektne varijable $L_{pp}$, $B$, $d_s$, $C_B$, $V_{car}$, $v_{tr}$ se variraju unutar projektnog područja u zadanim koracima: $L_{step}$, $B_{step}$, $d_{s\ step}$, $C_{B\ step}$, $V_{car\ step}$, $v_{tr\ step}$. Svaka kombinacija projektnih varijabli treba biti provjerena u odnosu na projektna ograničenja i odbačena ukoliko ih ne zadovoljava.

### 7.1.3 Proračun visine broda i provjera minimalnog nadvođa

Visina broda $D$ se dobije jednostavnim proračunom iz ulaznih podataka (aktualne vrijednosti volumena teretnog prostora $V_{car}$ i specifične voluminoznosti broda $\kappa$) i aktualne kombinacije projektnih varijabli $L_{pp}$, $B$. Proračun minimalnog nadvođa se u ovoj fazi izrade projekta može izvesti samo približno [5,6,16,17,18]. Ukoliko aktualna visina broda ne zadovoljava zahtijevano minimalno nadvođe za zadanu kombinaciju varijabli, projektno rješenje se odbacuje.

### 7.1.4 Proračun minimalne snage porivnog stroja

Približan proračun minimalne snage porivnog stroja je moguće provesti na različite načine, empirijskim formulama [1,2], točnijim aproksimativnim izrazima za pojedino područje osnovnih izmjera i brzine broda [4,5,6,11,16,17,18], ili nekom drugom metodom.

### 7.1.5 Proračun istisnine, vlastite mase i ukupne nosivosti

Istisnina broda $\Delta$ je definirana kao umnožak osnovnih izmjera ($L_{pp}$, $B$, $d_s$ i $C_B$) i specifične mase morske vode $\gamma_{tot}$ s uključenim utjecajem brodske oplate i privjesaka.

Ukupna nosivost $DW$ je definirana kao razlika istisnine $\Delta$ i vlastite mase broda $LS$.

Vlastita masa broda se sastoji od tri glavne komponente: mase čelične konstrukcije $W_{st}$, mase strojo opreme $W_m$ i mase ostale opreme $W_o$. Za proračun pojedinih masa postoji širok izbor iskustvenih podataka i formula dostupnih u literaturi, npr. [1,2,4,5,6,11,16,17,18]. Potrebna istisnina se računa kao zbroj vlastite mase i ukupne nosivosti. Postignuta istisnina se računa kao umnožak osnovnih izmjera broda $L_{pp}$, $B$, $d_s$, $C_B$ i specifične mase morske vode s uključenim utjecajem oplate broda i privjesaka te mora odgovarati potrebnoj u okvirima zadovoljenja projektnog atributa ukupne nosivosti ($DW$).

### 7.1.6 Proračun cijene novogradnje

Ukupnu cijenu novogradnje $C_{nb}$ čine cijena materijala $C_{mat}$, cijena rada (procesa) $C_{lab}$ 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 $C_{res}$.

Cijena ciljanog porivnog stroja je zadana kao fiksna veličina.

Cijena čelika direktno ovisi o glavnim izmjerama broda i njihovim odnosima te o jediničnoj nabavnoj cijeni čelika. Računa se približnim iskustvenim formulama.

Cijena preostalog materijala se sastoji od nabavnih cijena sve preostale brodske opreme - opreme za pretovar tereta i balasta, kormilarenje, sidrenje i privez, smještaj posade, navigaciju, automatizaciju, pomoćnih strojeva i uređaja, opreme 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. Cijena procesa po jedinici proizvoda (umnožak jedinične satnice $v_{lab}$ i proizvodnosti brodogradilišta $P_{cGT}$) se množi sa "količinom proizvoda" mjerenom kompenziranim bruto tonama *cGT*.

Preostali troškovi $C_{pt}$ se jednim dijelom sastoje od fiksnih troškova $C_{pt\ fix}$ (npr. troškovi klasifikacijskog društva, angažmana vanjskih institucija, dokovanja, remorkera), a drugim dijelom od varijabilnih troškova $C_{pt\ var}$ koji ovise o cijeni novogradnje (npr. troškovi financiranja, osiguranja, posredničke provizije).

## 7.2 Specifičnosti osnivanja pojedinih tipova brodova

Prikazana opća projektna procedura je direktno primjenjiva kod osnivanja tankera i brodova za prijevoz rasutih tereta, dok prilikom primjene na ostale tipove brodova treba voditi računa o njihovim specifičnostima te prema tome prilagoditi proceduru.

Kod osnivanja brodova za prijevoz container-a treba voditi računa da na osnovne izmjere broda dominantno utječe geometrija tereta. U ovoj su vrsti tereta dominantna skupina ISO container-i duljine 20, odnosno 40 stopa (6.096 m, odnosno 12.192 m), širine 8 stopa (2.438 m) i visine 8, 8.5, 9 ili 9.5 stopa (2.438, 2.591, 2.743 ili 2.8956 m). O tome treba voditi računa kod određivanja osnovnih izmjera broda te zadavanja njihovih minimalnih i maksimalnih vrijednosti i pripadnih prirasta prilikom provođenja postupka optimizacije. Na duljinu teretnog prostora, pa time i duljinu broda utječe duljina palubnih grotala (u pravilu 40 stopa ili višekratnik s dodatkom za zračnost i dodatkom zbog konstrukcijskog rješenja strukture ugla palubnog grotla), te stoga nema smisla povećavati duljinu broda za iznos koji ne dopušta smještaj još jednog reda container-a. Slični razlozi vrijede i za određivanje širine i visine broda. Kod zadavanja širine broda treba voditi računa i o smještaju container-a koji se prevoze na glavnoj palubi, pa tako širina broda treba biti višekratnik (s određenom marginom) širine container-a. Visina

broda je funkcija visine brodskog dvodna, visine pražnica grotala, višekratnika visine container-a te vertikalne zračnosti između grotlenog poklopca i najvišeg potpalubnog container-a. Kako postoje ISO container-i različite visine najčešće se geometrija bazira na „srednjoj“ visini container-a od 8.5 stopa.

Slična je situacija u provođenju projektne procedure i kod osnivanja brodova za prijevoz rashlađenih tereta. Kod standardne konfiguracije broda (višepalubni teretni prostor, ukrcaj/iskrcaj dizalicama kroz teretna grotla s razvozom tereta viljuškarima, strojarnica na krmi, kaštel produljen na prvo skladište) geometrija skladišta tereta je zadana geometrijom osnovnog tereta – paletom dimenzija 1.2 x 1.0 m i minimalnom svijetlom visinom teretnih paluba od 2.2 m uvećanom za zadanu zračnost. Prije provođenja projektne procedure treba odrediti tip sustava rashlade tereta (uzdužno ili poprečno ventiliranje skladišta tereta) jer on, uz geometriju standardne palete, utječe na određivanje duljine i širine teretnih skladišta.

Provođenje projektne procedure prilikom osnivanja brodova za prijevoz automobila je, kao i kod osnivanja brodova za prijevoz rashlađenih tereta, definirano geometrijom osnovnog tereta. U ovom slučaju dimenziju teretne palete zamjenjuju duljina i širina automobila, a minimalnu visinu međupaluba definiraju visine prevoženih automobila s zadanom vertikalnom zračnošću i dimenzija instalirane opreme za ventilaciju teretnog prostora. Naravno, kod ovih se brodova ukrcaj/iskrcaj tereta ne vrši vertikalnim, već horizontalnim transportom pomoću ulazno-izlaznih rampi i rampi između pojedinih teretnih paluba.

Kod osnivanja trajekata, Ro-Ro brodova i Ro-Pax brodova dominantan je utjecaj zahtjeva za duljinom traka za parkiranje (smještaj) vozila. Ovi su brodovi namijenjeni operiranju na unaprijed poznatim linijama sa poznatim teretima i ukrcajno/iskrcajnim lučkim kapacitetima, te su visoko specijalizirani. Uglavnom se osnivaju provođenjem specijalnih projektnih procedura, većinom vezivanjem projekta za prototipni brod.

Još je značajno spomenuti specifičnosti kod osnivanja brodova za prijevoz ukapljenog plina. Brodovi za prijevoz ukapljenog prirodnog plina (LNG tankeri) se dijele na brodove građene prema dvjema vrlo različitim koncepcijama: s membranskim tankovima tereta i s nezavisnim sferičnim tankovima tereta. Tankeri s membranskom izolacijom teretnih tankova su po općoj konfiguraciji vrlo slični tankerima za prijevoz naftnih derivata, pa se izložena projektna procedura može slijediti bez većih problema. Osnovne karakteristike tankera s sferičnim teretnim tankovima su pod dominantnim utjecajem broja i veličine tankova, te tehničkog rješenja njihove izolacije i temeljenja na brodsku strukturu. Njihovo je osnivanje zbog toga vrlo specifično, te nije pogodno za optimiranje provođenjem opće projektne procedure. Vrlo je slična situacija i kod brodova za prijevoz tekućih naftnih plinova (LPG tankeri) koji također teret prevoze u nestrukturnim tankovima.

# 8 MATEMATIČKI MODUL OSNIVANJA TRGOVAČKOG BRODA

Matematički modul osnivanja trgovačkog broda je sastavni dio nove projektne procedure osnivanja trgovačkog broda prikazane Slikom 4. Modulom je obuhvaćen osnovni matematički model osnivanja broda objavljen u [16,17,18], a razvijen na temelju ranijih modela objavljenih u [4,5,6,7,8,9,10,11]. Nadalje izloženi matematički model se u pojedinim elementima razlikuje od prethodno objavljenih te je prilagođen primjeni u novoj metodologiji.

## 8.1 Definicija projektnog zadatka

### 8.1.1 Projektne varijable $\boldsymbol{x}_{dsgn} = \{L_{pp}, B, d_s, C_B, V_{car}, v_{tr}, I_{me}\}$

Sljedeće projektne varijable se variraju unutar min-max ograničenja:

- duljina među okomicama $L_{pp}$ (m),
- širina $B$ (m),
- maksimalni gaz $d_s$ (m),
- koeficijent punoće $C_B$ (-),
- volumen teretnog prostora $V_{car}$ ($m^3$),
- brzina broda $v_{tr}$ (čv),
- identifikator porivnog stroja $I_{me\,i}$ (-).

### 8.1.2 Projektni parametri $\boldsymbol{d}_{dsgn} = \{\boldsymbol{d}_{req}, \boldsymbol{d}_{calc}, \boldsymbol{d}_{cost}\}$

Prva grupa projektnih parametara ($\boldsymbol{d}_{req}$) su projektni zahtjevi koji su kod većine trgovačkih brodova sljedeći:

- ukupna nosivost $DW_{req}$ (t),
- volumen teretnog prostora $V_{car\,req}$ ($m^3$),
- tražena brzina $v_{tr\,req}$ (čv).

Drugu grupu projektnih parametara ($\boldsymbol{d}_{calc}$) čine veličine koje su nužne za provedbu projektnih proračuna. Tu spadaju podaci koji su nužni za proračun osnovnih karakteristika projekta (visine broda, postignutog volumena teretnog prostora, mase čelične konstrukcije i vlastite mase broda), odnosno:

- "specifična voluminoznost broda" $\kappa = \dfrac{V_{car}}{L_{pp}BD}$ (-),
- procijenjeni utjecaj upotrebe čelika povišene čvrstoće na smanjenje mase čelične konstrukcije $f_1$ (%),

Specifična voluminoznost broda je iskustveni podatak koji varira ovisno o tipu broda, veličini broda, općem aranžmanu brodskih prostora i odnosima glavnih izmjera broda. Osnovno nastojanje projektanta je postići što veću specifičnu voluminoznost, vodeći računa pri tome o realno dosezivom nivou, odnosno nastojeći ne ugroziti nijednu funkciju broda.

Faktor utjecaja upotrebe čelika povišene čvrstoće na smanjenje mase čelične konstrukcije se zadaje kao postotak procijenjenog smanjenja mase u odnosu na brodsku konstrukciju izgrađenu u cijelosti od običnog brodograđevnog čelika. Ovaj utjecaj ovisi o vrsti i količini upotrebljenog čelika povišene čvrstoće. Dva su glavna razloga upotrebe ovog materijala: prvi je uzrokovan projektantovom željom za smanjenjem dimenzija elemenata brodske konstrukcije zbog tehničkih i tehnoloških razloga, a drugi je komercijalne naravi – snižavanje cijene novogradnje. Neselektivna primjena čelika povišene čvrstoće često je bila uzrokom pojave problema vezanih uz brodsku konstrukciju tijekom eksploatacije broda te je stoga preporučljivo ograničiti upotrebu na područja gdje je to nužno i tehnički opravdano. Maksimalni iznos uštede na masi brodske čelične konstrukcije je oko 15% (kod vrlo velikog opsega upotrebe čelika povišene čvrstoće).

Treća grupa su parametri ($\boldsymbol{d}_{cost}$) koji su potrebni za izračun cijena materijala, rada (procesa), preostalih troškova i ukupne cijene novogradnje, odnosno:

- maksimalne snage porivnih strojeva $MCR_i$ (kW),
- cijene porivnih strojeva $C_{me\,i}$ (€),
- prosječna jedinična cijena čelika $c_{st}$ (US$/t),
- odnos bruto/neto mase čelika $c_{gwst}$ (-)
- cijena preostalog materijala i opreme $C_{res}$ (€),
- proizvodnost brodogradilišta $P_{cGT}$ (rs/cGT),
- jedinična satnica $v_{lab}$ (€/rs),
- preostali fiksni troškovi $C_{pt\,fix}$ (€),
- udio preostalih varijabilnih troškova u cijeni novogradnje $c_{var}$ (%),
- odnos €/US$ $ER$ (-).

Porivni stroj je, uz čelik, najveća pojedinačna stavka u cijeni materijala koji se ugrađuje u novogradnju. U brodogradilištima je uobičajena praksa da se cijena porivnog stroja prikazuje kao zasebna stavka u osnovnim grupama troškova, pa se i u ovom modelu slijedi ta praksa.

Prosječna jedinična cijena čelika predstavlja cijenu po toni čelika u kojoj je uzet u obzir utjecaj svih vrsta nabavljenog čelika, kako po kvaliteti (obični brodograđevni čelik ili čelik povišene čvrstoće), tako i po tipu poluproizvoda (lim, profil ili odljevak).

Preostali materijal i oprema se u ovoj fazi razrade projekta može smatrati konstantnom veličinom neovisnom o variranju osnovnih izmjera unutar projektnog područja.

Proizvodnost brodogradilišta predstavlja omjer radnih sati potrebnih za izgradnju broda i „količine proizvoda“ koja je prikazana kompenziranim bruto tonama.

Jedinična satnica brodogradilišta je prosječna cijena jednog proizvodnog radnog sata brodogradilišta.

Preostali troškovi obuhvaćaju sve ostale troškove koji se odnose na novogradnju, dijelom su fiksni (troškovi klasifikacijskog društva, modelskih ispitivanja, vanjskih institucija, dokovanja, remorkera i slično), a dijelom su varijabilni i ovise o cijeni novogradnje (troškovi financiranja, osiguranja, posredničke provizije, i slično).

### 8.1.3 Projektna ograničenja $\boldsymbol{g}_{dsgn} = \{\boldsymbol{g}_{min\text{-}max}, \boldsymbol{g}_{ratios}\}$

Prvu skupinu ograničenja čine ograničenja projektnih varijabli pripadnim minimalnim i maksimalnim vrijednostima ($\boldsymbol{g}_{min\text{-}max}$) i prikazana su sljedećom tablicom:

| varijabla | donja granica | gornja granica |
|---|---|---|
| $L_{pp}$ | $L_{pp\ min}$ | $L_{pp\ max}$ |
| $B$ | $B_{min}$ | $B_{max}$ |
| $d_s$ | $d_{s\ min}$ | $d_{s\ max}$ |
| $C_B$ | $C_{B\ min}$ | $C_{B\ max}$ |
| $V_{car}$ | $V_{car\ min}$ | $V_{car\ max}$ |
| $v_{tr}$ | $v_{tr\ min}$ | $v_{tr\ max}$ |

Tablica 4 Ograničenja projektnih varijabli kod osnivanja broda

Drugu skupinu ograničenja čine ograničenja međusobnih odnosa pojedinih varijabli ($\boldsymbol{g}_{ratios}$) i definiraju se sukladno projektantovim subjektivnim stavovima i iskustvu.

| odnos varijabli | donja granica | gornja granica |
|---|---|---|
| $L_{pp}/B$ | $(L_{pp}/B)_{min}$ | $(L_{pp}/B)_{max}$ |
| $L_{pp}/d_s$ | $(L_{pp}/d_s)_{min}$ | $(L_{pp}/d_s)_{max}$ |
| $B/d_s$ | $(B/d_s)_{min}$ | $(B/d_s)_{max}$ |
| $L_{pp}/D$ | $(L_{pp}/D)_{min}$ | $(L_{pp}/D)_{max}$ |

Tablica 5 Ograničenja odnosa projektnih varijabli kod osnivanja broda

Problematika zadavanja ograničenja odnosa projektnih varijabli i koeficijenta punoće je detaljno izložena u [16,17].

### 8.1.4 Zavisna projektna svojstva (atributi) $\boldsymbol{y}_{dsgn}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{p}) = \{\boldsymbol{y}_{ach}, \boldsymbol{y}_{yard}\}$

Zavisna projektna svojstva (atributi) su funkcije projektnih varijabli i parametara. Dijele se u dvije skupine. Prvu skupinu čine atributi koji predstavljaju realizirane projektne zahtjeve ($\boldsymbol{y}_{ach}$). Druga skupina su preostali atributi ($\boldsymbol{y}_{yard}$) koji su takvim definirani zbog svojeg značaja i utjecaja na kvalitetu projekta. Prvu skupinu ($\boldsymbol{y}_{ach}$) čine sljedeći atributi:

- Ukupna nosivost $DW_{ach}$ (t),
- Volumen teretnog prostora $V_{car\ ach}$ ($m^3$),
- Brzina na pokusnoj plovidbi $v_{tr\ ach}$ (čv).

Na ovom je mjestu potrebno dati dodatno objašnjenje. Ova grupa atributa je specifična zbog toga što su sve tri navedene veličine ujedno i projektni parametri, a volumen teretnog prostora i brzina broda ujedno i projektne varijable. Po pitanju njihovog pojavljivanja u obliku projektnih parametara može se reći da se u tom slučaju pojavljuju kao projektni zahtjevi, koji ne moraju uvijek biti u potpunosti i ostvareni. Pojavljivanje u ulozi atributa je vezano uz njihove realizirane vrijednosti, odnosno one vrijednosti koje će biti pridružene svakom projektnom rješenju.

Višestruka uloga projektnih zahtjeva proizlazi iz činjenice da se oni ispunjavaju s određenom točnošću. Prilikom razvoja novog projekta broda moguće je procijeniti iznos projektnih atributa samo približno. Naravno, kvaliteta procjene ovisi o iskustvu i kvaliteti projektanta i primijenjenog projektnog modela. Od navedenih projektnih zahtjeva najveća se preciznost može postići kod procjene volumena teretnog prostora, a nakon toga kod procjene ukupne nosivosti. Najmanja točnost se postiže kod određivanja brzine broda, što je i razumljivo zbog kompleksnosti brodske hidrodinamike.

Volumen teretnog prostora i tražena brzina se osim u obliku atributa $V_{car\ ach}$, $v_{tr\ ach}$ i parametara $V_{car\ req}$, $v_{tr\ req}$ javljaju i kao projektne varijable $V_{car}$ i $v_{tr}$, odnosno imaju trojnu ulogu. Ova situacija je objašnjena u daljnjem tekstu.

Volumen teretnog prostora $V_{car}$ je direktno vezan za visinu broda $D$ preko koeficijenta voluminoznosti broda $\kappa$. Zbog toga bi se projektni postupak mogao postaviti i na takav način da se umjesto volumena teretnog prostora $V_{car}$ kao varijabla definira visina broda $D$. Tada bi se unutar min-max ograničenja varirala visina broda u funkciji projektne varijable, dok bi se volumen teretnog prostora $V_{car}$ dobio kao rezultat proračuna. Međutim, u tom slučaju bi trebalo proširiti projektni prostor, jer u fazi osnivanja broda nema dovoljno kvalitetnih saznanja o očekivanoj visini broda. Stoga je jednostavnije i operabilnije tretirati volumen teretnog prostora $V_{car}$ kao varijablu i varirati ga unutar pripadnih min-max ograničenja, a visina broda $D$ dobiti kao rezultat proračuna.

Brzina broda $v_{tr}$ je povezana sa snagom porivnog stroja $CSR$ preko izraza za izračun snage u kojem je snaga porivnog stroja funkcija brzine $v_{tr}$, glavnih izmjera broda $L_{pp}$, $B$, $d_s$ i $C_B$ i međusobnog odnosa $L_{pp}$ i $d_s$. Snaga $CSR$ je također funkcija okretaja porivnog stroja, odnosno propelera, pošto je baza podataka izrađena s varijabilnim okretajima, odnosno, rezultirajuće brzine u bazi podataka su funkcije odgovarajućih snaga s pripadnim okretajima. Zbog složenosti postupka izrade baze podataka i aproksimativnog

izraza za snagu porivnog stroja, najelegantniji način za definiranje projektnog prostora je da se brzina broda $v_{tr}$ tretira kao projektna varijabla, da se varira unutar pripadnih min-max ograničenja, a da se rezultirajuća snaga *CSR* definira kao atribut.

Druga skupina ($\boldsymbol{y}_{yard}$) se sastoji od sljedećih atributa:

- Masa čelične konstrukcije $W_{st}$ (t),
- Snaga porivnog stroja *CSR* (kW),
- Cijena materijala $C_{mat}$ (US$),
- Cijena rada (procesa) $C_{lab}$ (US$),
- Cijena broda $C_{nb}$ (US$).

Masa čelične konstrukcije 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.).

Snaga porivnog stroja ovisi o brzini broda, glavnim izmjerama broda i njihovim odnosima te o broju okretaja porivnog stroja i vijka.

Cijena materijala ovisi o ukupnoj cijeni čelika, cijeni odabranog tipa porivnog stroja i cijeni preostalog materijala.

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

Cijena broda je zbroj cijene materijala, cijene rada i iznosa preostalih troškova.

Navedeni atributi mogu služiti za ocjenu kvalitete projekta i to na način da se uspoređuje postignuta vrijednost svakog atributa u pojedinom projektnom rješenju s pripadajućom ciljanom vrijednošću. Ciljane vrijednosti za prvu skupinu atributa su ujedno i projektni zahtjevi, dok za drugu skupinu atributa projektant definira ciljane iznose. Projektant također definira „kvalitetu“ odstupanja pojedinog atributa od ciljane vrijednosti. Za tu se namjenu u ovom radu koriste neizrazite funkcije [26]. Njima se definiraju granice tolerabilnog odstupanja i „subjektivno zadovoljstvo“ postignutim odstupanjem unutar tolerabilnog područja odstupanja. Detaljan opis ovog postupka je iznesen u Poglavlju 12.

### 8.1.5 Projektni ciljevi $\boldsymbol{o}_{dsgn}$

Moguće je definirati velik broj raznovrsnih projektnih ciljeva ovisno o namjeni broda i specifičnostima pojedinog projekta, odnosno projektnog zahtjeva. U općem slučaju osnivanja trgovačkog broda mogu se nabrojati sljedeći projektni ciljevi:

1. Minimiziranje mase čelične konstrukcije broda

Projektni cilj minimalne mase čelične konstrukcije broda je naročito interesantan zbog želje za minimiziranjem 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, te aktualnoj cijeni brodograđevnog čelika, udio čelika može doseći do 30% ukupne cijene koštanja novogradnje.

2. Minimiziranje snage porivnog stroja

Porivni stroj je najskuplji dio brodske opreme i u ukupnoj cijeni koštanja broda može sudjelovati do oko 15%. Zbog toga je minimiziranje snage stroja izuzetno zanimljivo. U tom smislu treba uvažavati 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 ili pokušati iskoristiti do njegove maksimalne snage ili selektiranjem reduciranog broja okretaja povećati efikasnost propulzijskog sustava i smanjiti potrošnju goriva.

3. 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, a njihova se vrijednost može smatrati konstantnom.

4. 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.

5. 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 brodogradilište postiže najpovoljniji komercijalni rezultat za ugovoreni projekt i cijenu broda.

## 8.2 Variranje projektnih varijabli i provjera ograničenja

Projektne varijable (duljina među okomicama $L_{pp}$, širina $B$, maksimalni gaz $d_s$, blok koeficijent $C_B$, volumen teretnog prostora $V_{car}$ i brzina broda $v_{tr}$) variramo između njihovih minimalnih i maksimalnih vrijednosti s zadanim koracima:

- korak duljine broda $L_{pp\ step}$,
- korak širine broda $B_{step}$,
- korak maksimalnog gaza broda $d_{s\ step}$,
- korak koeficijenta punoće broda $C_{B\ step}$,
- korak volumena teretnog prostora $V_{car\ step}$,
- korak brzine broda $v_{tr}$.

Pri određivanju iznosa pripadnih koraka osnovnih izmjera broda $L_{pp}$, $B$ i $d_s$ treba obratiti pažnju da njihova veličina bude tehnološki izvediva u brodogradilištu, odnosno da ne budu premaleni.

Prije provedbe projektnog matematičkog modela nužno je provjeriti da li aktualna kombinacija projektnih varijabli zadovoljava zadana ograničenja međusobnih odnosa projektnih varijabli navedenih u Tablici 2 i odbaciti je ukoliko ne zadovoljava.

## 8.3 Proračun visine broda i provjera minimalnog nadvođa

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

$$D = \frac{V_{car}}{L_{pp} B \kappa} \text{ (m)} \tag{8.1}$$

Proračun minimalnog nadvođa se izvodi pojednostavljenim računom minimalnog nadvođa [5,6,16,17,18] baziranom na aktualnoj kombinaciji projektnih varijabli ($L_{pp}$, $B$, $d_s$, $C_B$), te unaprijed zadanim vrijednostima ostalih utjecajnih faktora (kaštel, krmica, preluk, palubni skok, drvo na palubi itd.).

U ovoj fazi nije moguće, a niti je potrebno, napraviti apsolutno točan proračun. Tijekom 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.

## 8.4 Proračun minimalne snage porivnog stroja

U ovom radu je upotrebljena metoda za aproksimaciju trajne snage u službi *CSR* koja je korištena u [4,5,6,11,16,17,18]. Primijenjenom metodom je moguće postići visoku preciznost matematičkog izraza za približni proračun snage – u pravilu prosječno odstupanje aproksimiranih vrijednosti od stvarnih iznosi manje od 1%.

U prezentiranoj metodi se 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 $C_B$) i s adekvatnim brojem okretaja porivnog stroja, odnosno brodskog vijka, vrši aproksimacija snage funkcijom zadanog oblika. 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 ovom je radu za izradu baze podataka korišten, kao i u [4,5,6,11,16,17,18], 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 odgovarajući broj okretaja propelera, izračuna se tražena snaga porivnog stroja.

Pri stvaranju baze podataka je moguća intervencija projektanta vezana uz prethodno iskustvo u radu s programom (program daje konzervativnu prognozu brzine i proračun brzine je na „sigurnoj strani“ za 0.2 do 0.4 čvora, ovisno u tipu i veličini broda). Regresijskom analizom 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.

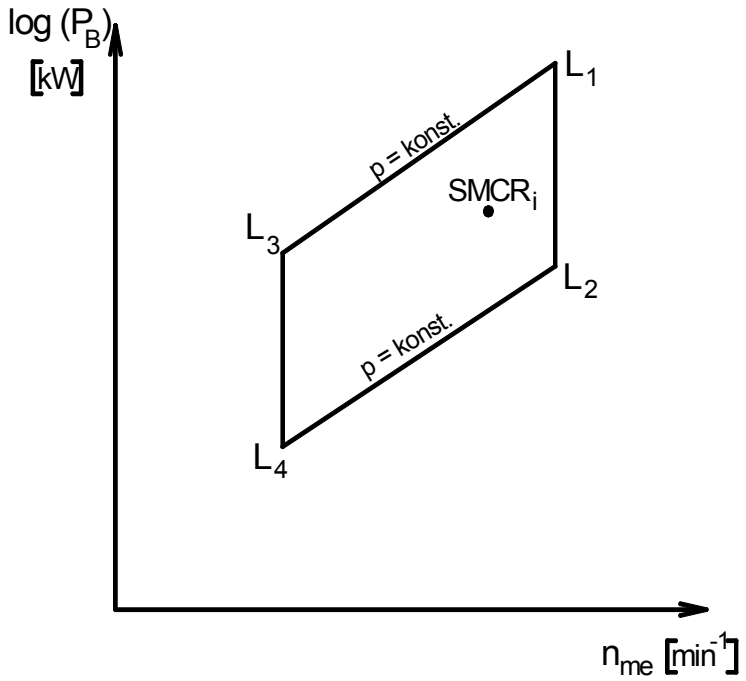
U ovom radu će biti korišten oblik upotrebljen u [4,5,6,11,16,17,18], gdje je $CSR$ definiran sljedećom aproksimacijom:

$$CSR = a_1 L_{pp}{}^{a2} B^{a3} d_s{}^{a4} C_B{}^{a5} v_{tr}{}^{a6} \left(1 + a_7 \frac{L_{pp}}{d_s}\right) \text{(kW)} \tag{8.2}$$

Ovaj se oblik funkcije aproksimacije pokazao vrlo kvalitetnim, a osim toga daje projektantu mogućnost uvida u utjecaj pojedinih projektnih varijabli i parametara na kočenu snagu porivnog stroja.

## 8.5 Selektiranje maksimalne snage porivnog stroja

Suvremene sporohodne dvotaktne diesel motore karakterizira svojstvo da im se maksimalna snaga može zadati unutar granica područja koje je definirano krivuljama maksimalnog i minimalnog srednjeg efektivnog tlaka, odnosno maksimalnim i minimalnim brojem okretaja. Tipični izgled tog područja je prikazan sljedećom slikom.




Slika 16 Selektiranje snage porivnog stroja

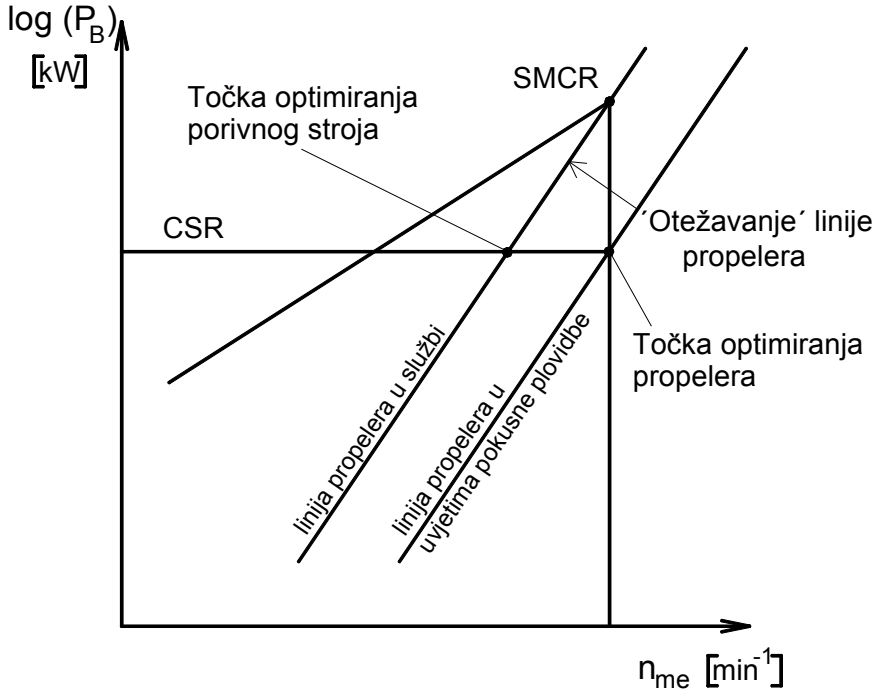
Na prethodnom se dijagramu može uočiti četverokut koji je zadan vrhovima $L_1$, $L_2$, $L_3$ i $L_4$. To je područje u kojem je dopušteno pozicioniranje selektirane maksimalne snage *SMCR* porivnog stroja. Linije koja se protežu između točaka $L_1$ i $L_3$, odnosno točaka $L_2$ i $L_4$ su dijelovi pravaca (snaga linearno ovisi o tlaku) i one omeđuju raspoloživo područje obzirom na maksimalni srednji efektivni tlak (linija između točaka $L_1$ i $L_3$), odnosno na minimalni srednji efektivni tlak (linija između točaka $L_2$ i $L_4$). Minimalni srednji efektivni tlak uobičajeno je iznosio 0.8 maksimalnog tlaka, a kod novijih izvedbi strojeva iznosi 0.9 maksimalnog srednjeg efektivnog tlaka. Linija između točaka $L_1$ i $L_2$ označava okretaje porivnog stroja koje on može maksimalno trajno razviti, a linija između točaka $L_3$ i $L_4$ označava najniže okretaje porivnog stroja kod kojih se može pozicionirati *SMCR*.

Maksimalnu selektiranu snagu *SMCR* porivnog stroja je dopušteno zadati bilo gdje unutar ovako definiranog četverokuta. Pri tome treba voditi računa o dvama dominantnim premisama. Prva činjenica je da specifična potrošnja goriva porivnog stroja ovisi o srednjem efektivnom tlaku i to na način da potrošnja raste s tlakom. Drugim riječima, pozicioniranje *SMCR-a* u područje nižih tlakova rezultira nižom potrošnjom goriva po isporučenoj jedinici snage, a ušteda se kreće do iznosu od oko 3.5% (odnos specifične potrošnje pri maksimalnom i minimalnom tlaku).

Druga važna činjenica o kojoj treba voditi računa prilikom određivanja položaja *SMCR-a* je stupanj efikasnosti brodske propulzije u odnosu na odabrane okretaje porivnog stroja. Naime, stupanj djelovanja brodskog vijka raste sa snižavanjem broja okretaja.

Lako se može dokazati da ukupan stupanj djelovanja propulzijskog sustava raste brže sa snižavanjem broja okretaja propelera nego s obaranjem srednjeg efektivnog tlaka stroja, pa je stoga preporučljivo selektirati maksimalnu snagu porivnog stroja pri nižim okretajima i višim srednjim efektivnim tlakovima. Naravno, pri tome treba voditi računa da rezultirajući propeler bude što bliže optimalnom, te da njegov promjer bude unutar granice maksimalno ugradivog.

Nakon što je definirana točka *SMCR-a* porivnog stroja mogu se odrediti točka optimiranja propelera i točka optimiranja stroja. U pravilu se to radi u skladu s narednom slikom.




Slika 17 Optimiranje porivnog stroja i propelera

Trajna snaga u službi *CSR* se definira kao 85-90% *SMCR-a* u ovisnosti o projektnom zahtjevu i/ili odluci projektanta. Obje varijante (85% i 90%) se često susreću, a naravno, moguće je taj odnos zadati i na bilo kojem nivou između krajnjih vrijednosti. Obje varijante imaju svojih diskretnih prednosti i nedostataka: u slučaju kad se zada odnos od 90% može se deklarirati nešto niža potrošnja goriva, ali je manja margina kod „otežane“ karakteristike otpora (služba broda). Obnuto vrijedi u slučaju kad se zada odnos *CSR-a* i *SMCR-a* od 85%.

Točka optimiranja porivnog stroja se uobičajeno zadaje na trajnoj snazi u službi *CSR*, te pri okretajima stroja koji proizlaze kad se *CSR* presiječe s propelernom krivuljom za

uvjete službe. Propelerna krivulja se za ovu potrebu najčešće aproksimira kubnom parabolom.

Točka optimiranja propelera se također zadaje na *CSR-u*, ali na nominalnim okretajima, odnosno na okretajima koji odgovaraju okretajima *SMCR-a*. Razlog za ovakav postupak se nalazi u želji da se u što većoj mjeri izbjegne preopterećivanje porivnog stroja u uvjetima službe, odnosno da „otežavanje“ propelerne krivulje dovede sustav u područje gdje porivni stroj može razviti maksimalnu snagu na nominalnim okretajima.

## 8.6 Proračun istisnine, vlastite mase i ukupne nosivosti

Istisnina je definirana kao:

$$\Delta = L_{pp} B d_s C_B \gamma_{tot} \text{ (t)} \tag{8.3}$$

gdje je $\gamma_{tot}$ (t/m$^3$) specifična masa morske vode s uključenim utjecajem oplate i privjesaka.

Ukupna nosivost je definirana kao razlika istisnine i vlastite mase broda, odnosno:

$$DW = \Delta - LS \text{ (t)} \tag{8.4}$$

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:

$$LS = W_{st} + W_m + W_o \text{ (t)} \tag{8.5}$$

Za proračun pojedinih masa postoji širok izbor iskustvenih podataka i formula dostupnih u literaturi, npr. [1,2,4,5,6,11,16,17,18]. Ovom prilikom će biti izloženi sljedeći opći oblici iskustvenih formula:

1) Masa čelične konstrukcije

$$W_{st} = \left(1 - \frac{f_1}{100}\right) \cdot \left\langle f_2 \left[L_{pp}\left(B + 0.85D + 0.15d_s\right)\right]^{1.36} \left\{1 + \frac{1}{2}\left[\left(C_{B-0.7}\right) + \left(1 - C_B\right)\frac{0.8D - d_s}{3d_s}\right]\right\} + f_3 \right\rangle \text{ (t)} \tag{8.6}$$

gdje su:

$f_1$ - faktor utjecaja upotrebe čelika povišene čvrstoće na smanjenje mase čelične konstrukcije (%)
$f_2$ - iskustveni faktor prikazan u [16,17]

$f_3$ - dodatak za masu nadgrađa i specifičnosti pojedinog projekta (kaštel, klasa leda i sl.) (t)

2) Masa strojo opreme

$$W_m = SMCR\frac{f_4 - 0.0034SMCR}{7350} \text{ (t)} \tag{8.7}$$

gdje su:

$SMCR = \frac{CSR}{f_5}$ - maksimalna selektirana snaga porivnog stroja (kW)

*CSR* - trajna snaga u službi (kW)
$f_4$ - iskustveni faktor prikazan u [16,17]
$f_5$ - odnos *CSR-a* i *SMCR-a*, kreće se od 0.85 do 0.9, ovisno o točki optimiranja porivnog stroja

3) Masa opreme

$$W_o = \left(f_6 - \frac{L_{pp}}{1620}\right)L_{pp}B + f_7 \text{ (t)} \tag{8.8}$$

gdje su:

$f_6$ - iskustveni faktor prikazan u [16,17]
$f_7$ - dodatak za masu brodske opreme koja je specifična za pojedini projekt (palubne dizalice, helikopterska platforma i sl.) (t)

## 8.7 Proračun cijene novogradnje

Cijena novogradnje $C_{nb}$ se sastoji od cijene materijala $C_{mat}$ , cijene rada (procesa) $C_{lab}$ i preostalih troškova $C_{pt}$, odnosno:

$$C_{nb} = C_m + C_{lab} + C_{pt} \text{ (US\$)} \tag{8.9}$$

gdje su:

$C_{mat}$ – cijena materijala (US$),
$C_{lab}$ – cijena rada (procesa) (US$),
$C_{pt}$ – preostali troškovi (US$),

### 8.7.1 Proračun cijene materijala

Cijena materijala $C_{mat}$ je definirana kao zbroj cijena osnovnih grupa materijala, odnosno:

$$C_{mat} = C_{mei}ER + C_{st} + C_{res} \text{ (US\$)} \tag{8.10}$$

gdje su:

$C_{me\,i}$ - cijena porivnog stroja (€),
$C_{res}$ - cijena preostalog materijala i opreme (US$),
$ER$ – odnos € i US$ (-)
$C_{st}$ - cijena nabavljenog čelika (US$), koja se računa na sljedeći način:

$$C_{st} = c_{qwst}W_{st}c_{st} \text{ (US\$)} \tag{8.11}$$

gdje su:

$c_{gwst}$ - odnos bruto/neto mase čelika (-)
$W_{st}$ - masa čelika (t)
$c_{st}$ - prosječna jedinična cijena čelika (US$/t)

### 8.7.2 Proračun cijene rada (procesa)

Cijena procesa $C_{lab}$ računa kako slijedi:

$$C_{lab} = cGT \cdot P_{cGT}v_{lab}ER \text{ (US\$)} \tag{8.12}$$

gdje su:

$P_{cGT}$ - proizvodnost brodogradilišta (rs/cGT)
$v_{lab}$ - jedinična satnica brodogradilišta (€/rs)
$cGT$ - kompenzirane bruto tone, prema OECD-u definirane kao:

$$cGT = A \cdot GT^{B^*} \tag{8.13}$$

gdje su:

$GT$ - bruto tonaža broda, prema [27] definirana kao:

$$GT = K_1V \tag{8.14}$$

gdje je:

$V$ - ukupni zatvoreni volumen broda ($m^3$)
$K_1$ - faktor koji se računa kao:

$$K_1 = 0.2 + 0.02 \log V \tag{8.15}$$

Faktori $A$ i $B^*$ su zadani sljedećom tablicom:

| Tip broda | $A$ | $B^*$ |
|---|---|---|
| Tanker za prijevoz nafte s dvostrukom oplatom | 48 | 0.57 |
| Tanker za prijevoz kemikalija | 84 | 0.55 |
| Brod za prijevoz rasutih tereta | 29 | 0.61 |
| Višenamjenski brodovi | 33 | 0.62 |
| Brod za prijevoz općih tereta | 27 | 0.64 |
| Brod za prijevoz rashlađenih tereta | 27 | 0.68 |
| Kontejnerski brod | 19 | 0.68 |
| Ro-Ro brod | 32 | 0.63 |
| Brod za prijevoz automobila | 15 | 0.70 |
| LPG tankeri | 62 | 0.57 |
| LNG tankeri | 32 | 0.68 |
| Trajekti | 20 | 0.71 |
| Putnički brodovi | 49 | 0.67 |
| Ribarski brodovi | 24 | 0.71 |
| Ostali „netrgovački“ brodovi* | 46 | 0.62 |

*remorkeri, jaružala, brodovi za opsluživanje platformi, brodovi za podmorska bušenja, itd.

Tablica 6 Faktori $A$ i $B^*$ za izračun *cGT-a*

### 8.7.3 Proračun preostalih troškova

Preostali troškovi su definirani na sljedeći način:

$$C_{pt} = C_{pt \cdot fix} ER + C_{pt \cdot \mathrm{var}} \text{ ( US\$)} \tag{8.16}$$

gdje su $C_{pt\ fix}$ (€) preostali troškovi koji se mogu smatrati fiksnim za pojedini tip i veličinu novogradnje, npr. troškovi:

- klasifikacijskog društva,
- modelskih ispitivanja i pripadnih proračuna,
- garantnih obveza,
- pokusne plovidbe,
- dokovanja,
- usluga remorkera i plovnih dizalica,
- montera i servisera,
- kemijskog tretmana cjevovoda,
- pocinčavanja,
- čišćenja novogradnje,
- ronilaca,
- ostali srodni troškovi.

Preostali varijabilni troškovi su definirani kao postotak cijene materijala i rada, odnosno:

$$C_{pt\ var} = c_{var} (C_{mat} + C_{lab}) \text{ (US\$)} \tag{8.17}$$

gdje je $c_{var}$ (%) odnos preostalih varijabilnih troškova i zbroja cijena materijala i rada.

U preostale varijabilne troškove spadaju sljedeće grupe troškova:

- financiranja (krediti, avansne garancije i kontragarancije i slično),
- posredničke provizije,
- osiguranja novogradnje,
- ronilaca,
- ostali srodni troškovi.

# 9 EKONOMSKI MODEL EKSPLOATACIJE TRGOVAČKOG BRODA

Ekonomski model eksploatacije trgovačkog broda je preuzet iz [21]. Kvaliteta poslovanja trgovačkog broda, odnosno pomorskih kompanija ovisi o sljedećim osnovnim aspektima poslovanja:

- investicijskom trošku, odnosno nabavnoj cijeni broda,
- prihodima od eksploatacije broda,
- troškovima eksploatacije broda i financiranja poslovanja,
- postignutoj cijeni prodaje broda nakon perioda eksploatacije.

Investicijski trošak ovisi o stanju brodograđevnog tržišta u trenutku ugovaranja novogradnje, odnosno o stanju tržišta polovnog brodovlja (ako se kupuje polovni brod), o čemu je prethodno pisano u Poglavlju 5.

Prihodi od eksploatacije broda prvenstveno ovise o tipu i veličini broda, starosti broda i stanju na pomorskom tržištu. Na prihode može u manjoj mjeri utjecati i reputacija kompanije koja je u vlasništvu broda (ili ga ima u najmu) te reputacija samog broda (vezana uz kvalitetu broda i brodske opreme i eventualne probleme u prethodnoj eksploataciji).

Troškovi eksploatacije i financiranja broda se sastoje od svih troškova koji su vezani uz poslovanje broda pri prijevozu tereta. Tu spadaju troškovi operiranja broda, troškovi periodičnog održavanja broda, troškovi putovanja, troškovi prekrcaja tereta i troškovi kapitala.

Troškovi operiranja broda se sastoje od troškova posade, zaliha, tekućeg održavanja broda, osiguranja i opće-administrativnih troškova. Troškovi periodičnog održavanja broda su troškovi dokovanja, pregleda i reparacija. Troškove putovanja čine troškovi goriva, lučkih pristojbi, pristojbi prolaska kanalima i troškovi remorkera i pilota. Troškovi kapitala se sastoje od otplate investicije u brod te troškova kamate i isplaćenih dividendi.

Prodajna cijena broda nakon perioda eksploatacije ovisi o tipu, veličini, starosti i općem stanju broda te o stanju tržišta polovnih brodova, odnosno stanju pomorskog tržišta.

## 9.1 Investicijski trošak

Ugovor o gradnji broda se sklapa između brodogradilišta i pomorske kompanije sa uobičajenim rokom izgradnje (primopredaje) broda od dvije do tri godine. Osnovne karakteristike i kretanja tržišta novogradnji i pomorskog tržišta prethodno su opisane u Poglavlju 5, pa će ovom prilikom biti spomenuta samo najznačajnija svojstva koja utječu na kvalitetu poslovanja broda, odnosno pomorske kompanije.

Oba tržišta imaju svojstvo variranja po sinusoidalnoj karakteristici s periodom obično od oko četiri godine. Kako je rok isporuke ugovorene novogradnje obično znatno kraći,

može se generalno zaključiti da će pomorska kompanija postići najpovoljnije rezultate poslovanja ako gradnju broda ugovori u stanju niskog brodograđevnog (i pomorskog) tržišta, pa da primopredaja novogradnje padne u period visokog pomorskog tržišta. Naravno, provedba ove ideje je u praksi znatno složenija, prvenstveno zbog toga što se na pomorskom i brodograđevnom tržištu redovno događaju i anomalije, te zbog toga što je u stanju niskog pomorskog tržišta teško doći do kapitala neophodnog za ugovaranje i izgradnju broda.

U ovom radu će biti analizirana isključivo varijanta s nabavkom novogradnje, jer je samo taj slučaj interesantan za optimiranje projekta broda.

## 9.2 Prihodi od eksploatacije broda

Osnovno svojstvo pomorskog tržišta je da se ponaša po sinusoidalnoj karakteristici s velikim razlikama između dna sinusoide (niskog tržišta) i tjemena sinusoide (visokog tržišta). Ova značajka pomorskog tržišta je prethodno opisana u Poglavlju 5.

Posljednjih je godina najveći utjecaj na pomorsko tržište imao nagli i veliki rast kineskog gospodarstva što je imalo za posljedicu povećavanje karakteristične sinusoide, i to kako u amplitudi, tako i u periodi. Kad su se u drugoj polovici 2008. godine superponirali negativni utjecaji usporenja rasta kineskog gospodarstva i recesija u SAD-u, došlo je kolapsa pojedinih segmenata pomorskog tržišta.

Nadalje će ovo kretanje pomorskog tržišta biti ilustrirano na primjeru minimalnog i maksimalnog dnevnog najma tankera i brodova za rasute terete tijekom 2007. i 2008. godine.

| Veličina i tip broda | Minimum (US$) / period | Maksimum (US$) / period |
|---|---|---|
| VLCC tankeri | 20.000 / 09.2007. | 220.000 / 12.2007. |
| Suezmax tankeri | 18.000 / 09.2007. | 175.000 / 08.2008. |
| Aframax tankeri | 15.000 / 09.2007. | 90.000 / 08.2008. |
| Panamax tankeri za prljave derivate | 15.000 / 11.2007. | 60.000 / 05.2008. |
| Panamax tankeri za čiste derivate | 13.000 / 10.2007. | 33.000 / 05.2007. |
| Handy tankeri za čiste derivate | 10.000 / 09.2007. | 35.000 / 05.2007. |
| Capesize bulkeri | 10.000 / 12.2008. | 220.000 / 05.2008. |
| Panamax bulkeri | 5.000 / 12.2008. | 80.000 / 04.2008. |
| Handymax bulkeri | 5.000 / 12.2008. | 65.000 / 10.2007. |

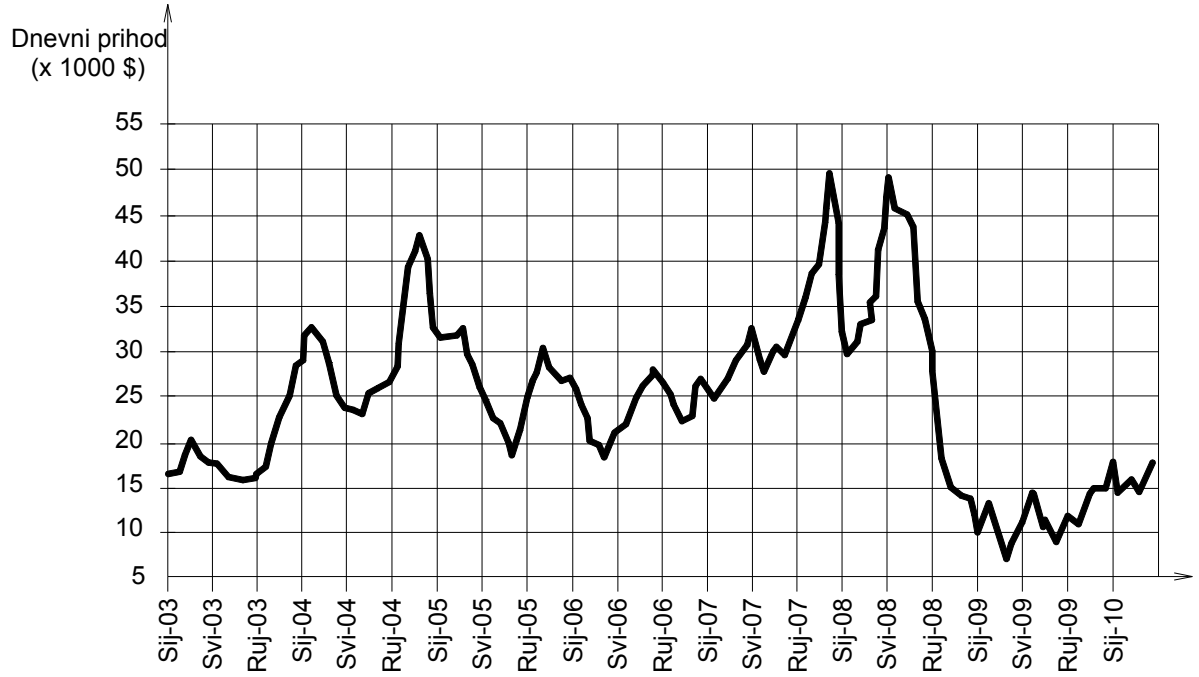
Tablica 7 Minimalni i maksimalni dnevni najam tankera i brodova za rasute terete tijekom 2007. i 2008. godine [D1]

Iz gornje tablice je uočljivo da je tijekom protekle dvije godine tankersko tržište jako variralo, pa je odnos maksimalnih i minimalnih vrijednosti, ovisno o veličini broda i vrsti tereta, iznosio od 3 : 1 (panamax za čiste derivate) do čak 11 : 1 (VLCC). Tržište brodova za prijevoz rasutih tereta je variralo još i više, prvenstveno zahvaljujući kolapsu tržišta krajem 2008. godine, te se odnos maksimuma i minimuma kretao od 1 : 13 (handymax) do gotovo nevjerojatnih 1 : 22 (capesize).

Ovako ekstremne promjene stanja ipak nisu karakteristične za dugoročnu sliku pomorskog tržišta. Situacija proteklih godina je prvo tijekom dugog perioda visokih vozarina omogućila pomorskim kompanijama izuzetno profitabilno poslovanje, a zatim je nagli i duboki pad vozarina izazvao paniku na tržištu. Posljedično, došlo je do prekida ugovaranja gradnje novih brodova, masovne preprodaje postojećih novogradnji i pada njihovih cijena.

Treba imati na umu da se u uvjetima normalnog tržišta investicija u brod isplaćuje u periodu od 10 do 15 godina. Tijekom tog perioda brod proživi nekoliko visokih i nekoliko niskih stanja tržišta. Pomorske kompanije koje posluju dugotrajno i stabilno računaju na dugoročnu isplativost broda. Takav pristup je preduvjet da se može prići optimiranju projekta obzirom na cjelokupni životni ciklus broda.

Dugoročnim predviđanjem kretanja pomorskog tržišta bave se specijalizirane firme koje publiciraju svoje prognoze ili po narudžbi pomorskih kompanija izrađuju posebne izvještaje, analize i prognoze stanja tržišta. Za potrebe ovog rada će dugoročno stanje pomorskog tržišta biti ilustrirano prikazom kretanja Clarkson-ovog indeksa pomorskog tržišta za period od 2003. godine do danas.




Slika 18 Indeks pomorskog tržišta od 2003. godine do danas [D1]

Iz gornje slike se može uočiti da je, unatoč velikim variranjima pomorskog tržišta, vidljiv stalni blagi rast prosječnog stanja tržišta. Takvo je ponašanje tržišta realno očekivati i u doglednoj budućnosti.

Prihodi od eksploatacije broda su uvodno opisani u Poglavlju 5. Kako nas u okviru ovog rada ne zanima način na koji se prihodi dijele između kompanije koja je vlasnik broda i kompanije koja brod operira, prihodi će biti prikazani u obliku dnevnog najma broda $R_{day}$, što je i najčešći oblik poslovanja broda i pomorske kompanije. Na godišnjem nivou brod uprihodi godišnji najam $R_{year}$, koji je umnožak dnevnog najma broda i broja dana u jednoj godini u kojima brod uprihoduje dnevni najam.

## 9.3 Troškovi eksploatacije broda i financiranja poslovanja

Troškovi eksploatacije broda i financiranja poslovanja $C_{run}$ se sastoje od troškova operiranja broda $C_{op}$, troškova periodičnog održavanja broda $C_{dock}$, troškova putovanja $C_{voy}$, troškova prekrcaja tereta $C_{car}$ i troškovi kapitala $C_{cap}$.

Troškovi operiranja broda $C_{op}$ se sastoje od troškova posade $C_{crew}$, troškova zaliha i maziva $C_{stor}$, troškova tekućeg održavanja $C_{main}$, troškova osiguranja $C_{ins}$ i općih troškova $C_{gen}$. Udio troškova operiranja broda u ukupnim troškovima eksploatacije uobičajeno iznosi oko 15%.

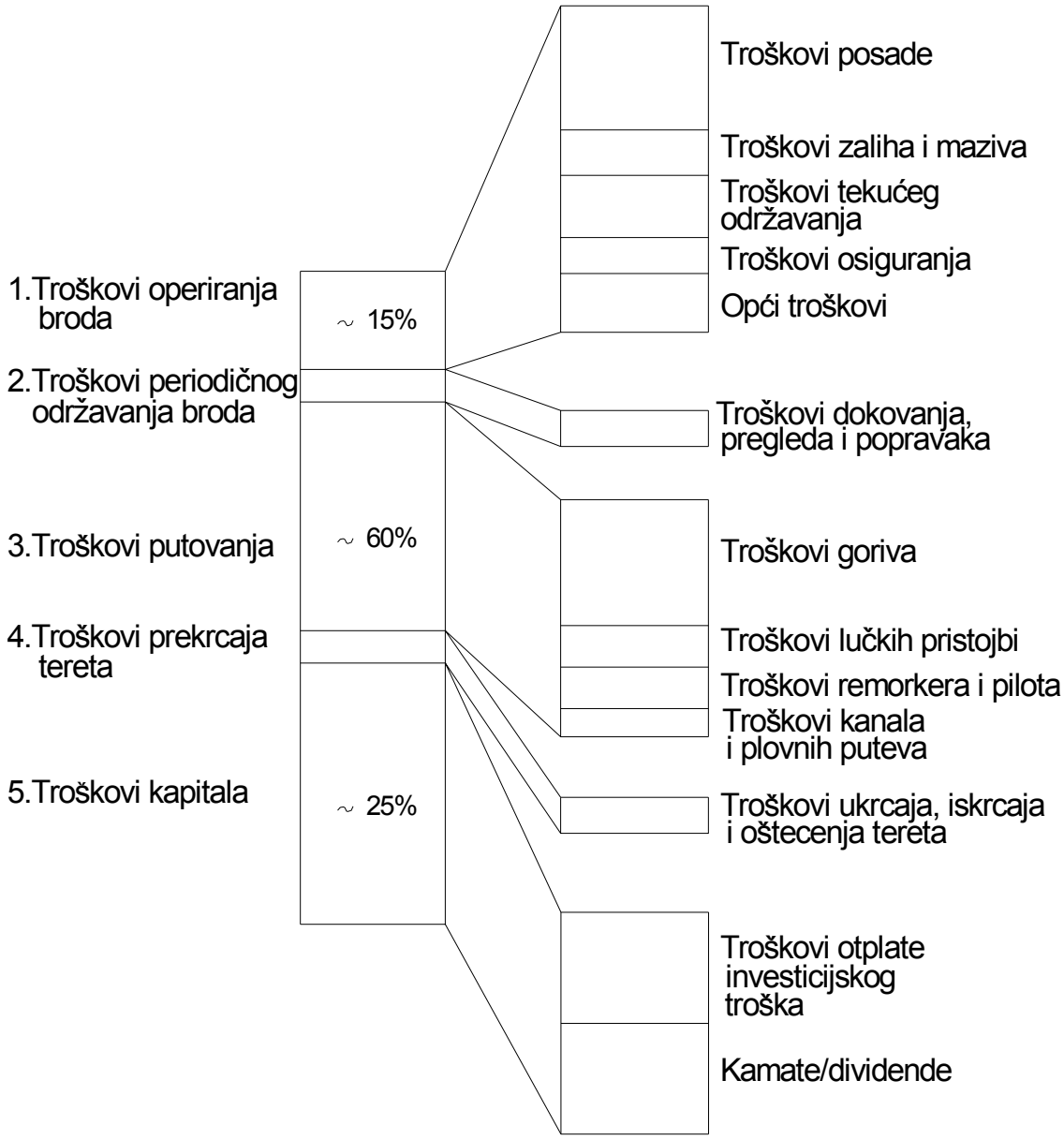
Troškove periodičnog održavanja broda $C_{dock}$ čine troškovi dokovanja, pregleda i popravaka. Dokovanje broda se u najvećem broju slučajeva izvodi u redovitim vremenskim razmacima od 2.5-3 godine, a obnova klase broda svakih 5 godina. Ovi troškovi obično predstavljaju mali dio ukupnih troškova.

Troškovi putovanja $C_{voy}$ se sastoje od troškova goriva $C_{fuel}$, troškova lučkih pristojbi $C_{port}$, troškova remorkera i pilota $C_{tug}$ i troškova kanala i plovnih putova $C_{can}$. Troškovi putovanja su jedna od dominantnih grupa troškova i dosežu oko 50% ukupnih troškova eksploatacije broda.

Troškovi prekrcaja tereta $C_{car}$ se sastoje od troškova ukrcaja tereta $C_{load}$, troškova iskrcaja tereta $C_{un}$ i troškova zbog oštećenja tereta $C_{claim}$. Ova grupa troškova je u relativnom iznosu manje značajna od ostalih troškova.

Troškove kapitala $C_{cap}$ čine troškovi uzrokovani otplatom investicijskog troška, kamatama i dividendama. Ovi su troškovi, uz troškove putovanja, dominantna grupa troškova i iznose oko 35% ukupnih troškova eksploatacije broda.

Prethodno opisana podjela troškova eksploatacije broda i financiranja poslovanja je zorno prikazana sljedećom slikom preuzetom iz [21]. Prikaz je ažuriran približnim udjelima pojedinih troškova prema aktualnom stanju tržišta.



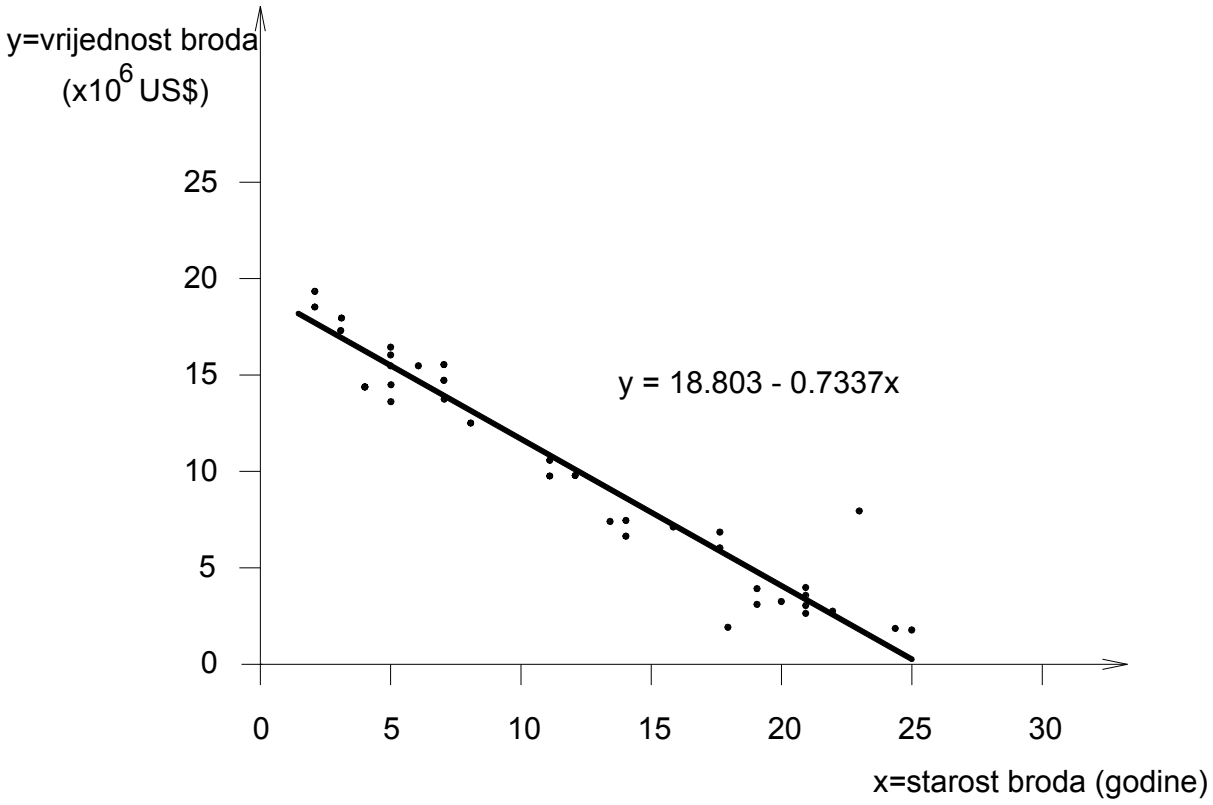

Slika 19 Podjela troškova eksploatacije broda i financiranja poslovanja [21]

## 9.4 Vrijednost broda nakon perioda eksploatacije

U petom poglavlju, točki 5.4 obrazložene su dvije osnovne mogućnosti za prodaju broda nakon perioda eksploatacije u matičnoj pomorskoj kompaniji: prodaja broda za daljnju eksploataciju drugoj kompaniji ili prodaja rezalištu kao otpadni čelik. Vrijednost broda kod prodaje rezalištu ovisi o vlastitoj masi broda i aktualnoj jediničnoj cijeni otpadnog čelika.

U slučaju prodaje broda drugoj pomorskoj kompaniji vrijednost broda ovisi o više utjecajnih faktora. Najveći utjecaj ima stanje pomorskog tržišta, odnosno, stanje tržišta polovnog brodovlja. Slikom 10 je prikazano variranje tržišta polovnih tankera i bulk carrier-a tijekom zadnjih deset godina gdje se može uočiti da je indeks cijena varirao u omjeru 1:5 kod bulk carrier-a, odnosno 1:2.5 kod tankera. Iz ove činjenice se može lako zaključiti da je prognoziranje kretanja cijena polovnog brodovlja za period od narednih 5, 10 ili 15 godina vrlo nesigurno i nezahvalno.

Stoga je kod procjene vrijednosti broda nakon određenog perioda eksploatacije uobičajeno računati njegovu vrijednost temeljem pada vrijednosti zbog starenja broda, pritom zanemarujući utjecaj budućih kretanja tržišta polovnih brodova. Ovaj pristup je ilustriran na narednoj slici [21] kojom je prikazana tržišna vrijednost polovnih panamax bulk carrier-a u ovisnosti o njihovoj starosti.




Slika 20 Tržišna vrijednost polovnih panamax bulk carrier-a prodanih tijekom prvih devet mjeseci 2002. godine [21]

Ukoliko želimo izračunati vrijednost polovnog broda nakon određenog perioda eksploatacije $C_{sh}$ uključivši pritom i utjecaj variranja tržišta moramo u proračun unijeti nove varijable. U ovom slučaju moramo, osim starosti broda, uzeti u obzir i postotak godišnje deprecijacije vrijednosti broda, godišnju stopu inflacije i očekivano variranje tržišta [21]. Narednom tablicom je prikazan proračun vrijednosti polovnog broda nakon

perioda eksploatacije od 10 godina, prosječnom godišnjom stopom deprecijacije od 5%, prosječnom godišnjom stopom inflacije od 2% i s očekivanim variranjem tržišta od 30% (u odnosu na srednje stanje). Iako je na Slici 20 prikazan primjer linearne funkcije aproksimacije tržišne vrijednosti polovnog broda, u ovom će radu biti korištena eksponencijalna funkcija aproksimacije.

| | |
|---|---|
| Vrijednost novogradnje (milijuna US$) | 50 |
| Period eksploatacije (godine) | 10 |
| Prosječna godišnja stopa deprecijacije (%) | 5 |
| Računovodstvena vrijednost (milijuna US$) | 29.94 |
| Prosječna godišnja stopa inflacije (%) | 2 |
| Očekivana srednja vrijednost broda (milijuna US$) | 36.49 |
| Variranje niskog tržišta (%) | 30 |
| Očekivana minimalna vrijednost broda (milijuna US$) | 25.54 |
| Variranje visokog tržišta (%) | 30 |
| Očekivana maksimalna vrijednost broda (milijuna US$) | 47.44 |

Tablica 8 Primjer izračuna vrijednosti polovnog broda

Iz prethodne se tablice može uočiti da vrijednost polovnog broda u najvećoj mjeri ovisi o stanju tržišta u trenutku procjene vrijednosti broda. Čak i pretpostavljena niska stopa variranja tržišta od 30% daje visok odnos maksimalne i minimalne vrijednosti polovnog broda od 1.85.

## 9.5 Rezultat poslovanja broda

Rezultat poslovanja broda u određenom vremenskom periodu može se definirati kao razlika vrijednosti broda na početku i kraju promatranog perioda uvećana ili umanjena za razliku prihoda od eksploatacije broda i troškova eksploatacije broda i financiranja poslovanja u istom tom periodu. U uobičajenim situacijama to znači da je brodu opala vrijednost starenjem tijekom eksploatacije, ali da u međuvremenu brod uprihodovao najmanje toliko da je pokrio troškove eksploatacije i financiranja.

U slučaju kad promatramo rezultat poslovanja novogradnje, vrijednost broda na početku eksploatacije je cijena koštanja novogradnje $C_{nb}$. Cijena broda na kraju perioda eksploatacije $C_{sh}$ se računa za odabrani vremenski period $T_{exp}$. Za isti se period računaju računaju prihodi i rashodi broda, te konačno rezultat poslovanja $P$ (profit).

# 10 MATEMATIČKI MODUL EKSPLOATACIJE TRGOVAČKOG BRODA

Matematički model eksploatacije trgovačkog broda se zasniva na ekonomskom modelu opisanom u prethodnom poglavlju. Izloženi model je prilagođen osnovnom cilju ovog rada: optimiranju projekta broda obzirom ne samo na atribute vezane uz projekt i izgradnju broda, već i za atribute vezane uz eksploataciju broda. Matematički model koji je nadalje izložen odnosi se na period eksploatacije broda od jedne godine, jer dio troškova broda ne bi bilo praktično rasporediti na kraći jedinični period.

## 10.1 Investicijski trošak (cijena novogradnje)

Cijena novogradnje $C_{nb}$ je definirana u Poglavlju 7, a računa se u sklopu matematičkog modela opisanog u Poglavlju 8. Za potrebe ovog rada cijena novogradnje koja je dobivena kao suma troškova koje brodogradilište ima prilikom gradnje broda neće biti uvećana za eventualni profit brodogradilišta, jer se projekt broda optimira obzirom na atribute koje su vezani kako uz poslovanje brodogradilišta tako i uz poslovanje pomorske kompanije. Pri tome se projekt broda optimira neovisno o raspodjeli eventualnog profita poslovanja broda.

## 10.2 Prihodi od eksploatacije broda

Prihodi od eksploatacije broda će biti prikazani, u skladu s iznesenim u Poglavlju 9, u obliku dnevnog najma broda $R_{day}$. Godišnji prihod $R_{year}$ se računa kao:

$$R_{year} = \left(365 - O_{year}\right) R_{day} \text{ (US\$)} \tag{10.1}$$

gdje je:

$O_{year}$ – ukupni broj dana u kojima je brod van najma

Ukupni broj dana u kojima je brod van najma je zbroj svih dana u kojima brod po raznim osnovama ne ostvaruje zaradu od svoje eksploatacije. Tu spadaju vremena provedena u dokovanju, čekanju zaposlenja, zaustavljanja broda od strane lučkih vlasti ili inspekcija itd.

## 10.3 Troškovi eksploatacije broda i financiranja poslovanja

Svi nadalje definirani troškovi se odnose na jedinični period od jedne godine. Troškovi eksploatacije broda $C_{run}$ su, prema izloženom u Poglavlju 9, sljedeći:

$$C_{run} = C_{op} + C_{dock} + C_{voy} + C_{car} + C_{cap} \text{ (US\$)} \tag{10.2}$$

gdje su:

$C_{op}$ – troškovi operiranja broda,
$C_{dock}$ – troškovi periodičnog održavanja broda,
$C_{voy}$ – troškovi putovanja,
$C_{car}$ – troškovi prekrcaja tereta,
$C_{cap}$ – troškovi kapitala.

Troškovi operiranja broda $C_{op}$ se sastoje od troškova posade, zaliha i maziva, tekućeg održavanja, osiguranja i općih troškova, odnosno:

$$C_{op} = C_{crew} + C_{stor} + C_{main} + C_{ins} + C_{gen} \text{ (US\$)} \tag{10.4}$$

gdje su:

$C_{crew}$ – troškovi posade (US$),
$C_{stor}$ – troškovi zaliha i maziva (US$),
$C_{main}$ – troškovi tekućeg održavanja (US$),
$C_{ins}$ – troškovi osiguranja (US$),
$C_{gen}$ – opći troškovi (US$).

Problem optimiranja troškova operiranja broda je svakako zanimljiv pomorskoj kompaniji, no u ovom radu troškove operiranja broda možemo smatrati fiksnim. Razlog za takvu odluku se nalazi u činjenici da pomorska kompanija može ovu grupu troškova optimirati neovisno o odabranom optimalnom projektu broda te u tom smislu polučiti jednako kvalitetne rezultate s brodovima izgrađenim prema različitim projektima, ali prema istom projektnom zahtjevu.

Troškove periodičnog održavanja broda $C_{dock}$ također smatramo fiksnim.

Troškovi putovanja $C_{voy}$ se sastoje od troškova goriva, lučkih pristojbi, remorkera i pilota te taksa kanala i plovnih putova, odnosno:

$$C_{voy} = C_{fuel} + C_{port} + C_{tug} + C_{can} \text{ (US\$)} \tag{10.5}$$

gdje su:

$C_{fuel}$ – troškovi goriva (US$),
$C_{port}$ – troškovi lučkih pristojbi (US$),
$C_{tug}$ – troškovi remorkera i pilota (US$),
$C_{can}$ – troškovi kanala i plovnih putova (US$).

Troškovi goriva $C_{fuel}$ se računaju za četiri različita režima tijekom putovanja:

- plovidba natovarenog broda,
- plovidba u balastu,
- ukrcaj tereta u luci,
- iskrcaj tereta u luci.

Potrošnja goriva u režimima plovidbe zavisi o broju dana plovidbe broda tijekom jedne godine, angažiranoj snazi porivnog stroja u slobodnoj vožnji, specifičnoj potrošnji goriva porivnog stroja, dnevnoj potrošnji goriva pomoćnih strojeva te o jediničnoj cijeni goriva.

Potrošnja goriva za vrijeme bavljenja broda u luci zavisi od tipa i veličine broda. Primjerice, tankeri iskrcavaju teret vlastitim teretnim sustavom, a ukrcavaju teret bez angažmana vlastitog teretnog sustava. Manji bulk carrier-i i manji brodovi za prijevoz container-a ukrcavaju i iskrcavaju teret vlastitim sustavom za prekrcaj tereta, dok veći bulk carrier-i veći brodovi za prijevoz container-a nemaju vlastitu opremu za prekrcaj tereta.

Za godišnji trošak goriva $C_{fuel}$ možemo pisati:

$$C_{fuel} = CC_{fuel} + CB_{fuel} + CL_{fuel} + CU_{fuel} \text{ (US\$)} \tag{10.6}$$

gdje su:

$CC_{fuel}$ – godišnji trošak goriva u režimu plovidbe natovarenog broda (US$),
$CB_{fuel}$ – godišnji trošak goriva u režimu plovidbe broda u balastu (US$),
$CL_{fuel}$ – godišnji trošak goriva u režimu ukrcaja tereta (US$),
$CU_{fuel}$ – godišnji trošak goriva u režimu iskrcaja tereta (US$).

Nadalje računamo trošak potrošenog goriva na godišnjem nivou u svakom pojedinom režimu. Za godišnji trošak goriva u režimu plovidbe natovarenog broda vrijedi:

$$CC_{fuel} = \left[T_{car}\left(24 \cdot CSR \cdot SFOC + FOCC_{aux}\right)\right]c_{fuel} \text{ (US\$)} \tag{10.7}$$

gdje su:

$T_{car}$ – broj dana tijekom jedne godine u kojem se brod nalazi u ovom režimu,
$CSR$ – trajna snaga u službi porivnog stroja (kW),
$SFOC$ – specifična potrošnja porivnog stroja (t/kWh),
$FOCC_{aux}$ – dnevna potrošnja goriva pomoćnih strojeva u ovom režimu (t),
$c_{fuel}$ – jedinična cijena goriva (US$/t).

Godišnji trošak goriva u režimu plovidbe broda u balastu se može računati kao:

$$CB_{fuel} = \left[T_{ball}\left(24 \cdot f_{ball} \cdot CSR \cdot SFOC + FOCB_{aux}\right)\right]c_{fuel} \text{ (US\$)} \tag{10.8}$$

gdje su:

$T_{ball}$ – broj dana tijekom jedne godine u kojem se brod nalazi u ovom režimu,
$f_{ball}$ – faktor smanjenja potrošnje goriva u balastu u odnosu na plovidbu natovarenog broda zbog smanjenog otpora broda i niže angažirane snage (-)
$FOCB_{aux}$ – dnevna potrošnja goriva pomoćnih strojeva u ovom režimu (t).

Godišnji trošak goriva u režimu ukrcaja tereta se može računati kao:

$$CL_{fuel} = (T_{load} \cdot FOCL_{aux})c_{fuel} \text{ (US\$)} \tag{10.9}$$

gdje su:

$T_{load}$ – broj dana tijekom jedne godine u kojem se brod nalazi u ovom režimu,
$FOCL_{aux}$ – dnevna potrošnja goriva pomoćnih strojeva u ovom režimu (t).

Godišnji trošak goriva u režimu iskrcaja tereta se može računati kao:

$$CU_{fuel} = (T_{un} \cdot FOCU_{aux})c_{fuel} \text{ (US\$)} \tag{10.10}$$

gdje su:

$T_{un}$ – broj dana tijekom jedne godine u kojem se brod nalazi u ovom režimu,
$FOCU_{aux}$ – dnevna potrošnja goriva pomoćnih strojeva u ovom režimu (t).

Troškovi prekrcaja tereta $C_{car}$ se sastoje od troškova ukrcaja tereta, troškova iskrcaja tereta i troškova zbog oštećenja tereta, odnosno:

$$C_{car} = C_{load} + C_{un} + C_{claim} \text{ (US\$)} \tag{10.11}$$

gdje su:

$C_{load}$ – troškovi ukrcaja tereta (US$),
$C_{un}$ – troškovi iskrcaja tereta (US$),
$C_{claim}$ – troškovi uzrokovani oštećenjem tereta (US$).

Troškovi prekrcaja tereta se zadaju kao fiksna veličina.

Troškovi kapitala $C_{cap}$ ovise načinu financiranja nabave novogradnje i eksploatacije broda. U suvremenom pomorstvu postoji cijeli niz različitih načina financiranja poslovanja brodova, odnosno pomorskih kompanija.

Kako namjena rada nije optimiranje poslovanja pomorske kompanije, već višeatributno optimiranje projekta broda obzirom i na atribute vezane uz operiranje broda, troškovi kapitala će biti predstavljeni pojednostavljenim matematičkim modelom. Godišnji trošak kapitala možemo zadati sljedećim izrazom:

$$C_{cap} = C_{nb} INT \ \text{(US\$)} \tag{10.12}$$

gdje su:

*INT* – prosječna godišnja stopa kamata i/ili dividenda (%)

## 10.4 Vrijednost broda nakon perioda eksploatacije

Vrijednost broda nakon perioda eksploatacije elaborirana je u devetom poglavlju, točka 9.4. Obzirom da nije moguće pouzdano prognozirati stanje tržišta polovnog brodovlja na dulji rok koji je u skladu s očekivanim periodom eksploatacije broda, vrijednost polovnog broda će se računati prema srednjoj očekivanoj vrijednosti. Obzirom da prilikom preprodaje broda novi kupac ne mora na isti način vrednovati komparativne prednosti broda kao prethodni vlasnik, kao osnova za proračun cijene polovnog broda neće biti uzeta cijena novogradnje $C_{nb}$, već cijena standardnog broda istih osnovnih karakteristika $C_{nb\text{-}stand}$, odnosno:

$$C_{sh} = C_{nb-stand}\left(1-\frac{DEP}{100}\right)^{T_{\exp}}\left(1+\frac{INF}{100}\right)^{T_{\exp}} \ \text{(US\$)} \tag{10.13}$$

gdje su:

$C_{sh}$ – vrijednost broda nakon perioda eksploatacije (US$)
$C_{nb\text{-}stand}$ – vrijednost „standardnog“ novog broda (US$)
*DEP* – prosječna godišnja stopa deprecijacije vrijednosti broda (%)
*INF* – prosječna godišnja stopa inflacije (%)

Minimalna vrijednost broda nakon perioda eksploatacije $C_{sh\text{-}min}$ je njegova vrijednost kao otpadnog čelika. Može se napisati da je:

$$C_{sh-\min} = LS \cdot c_{scrap} \ \text{(US\$)} \tag{10.14}$$

gdje su:

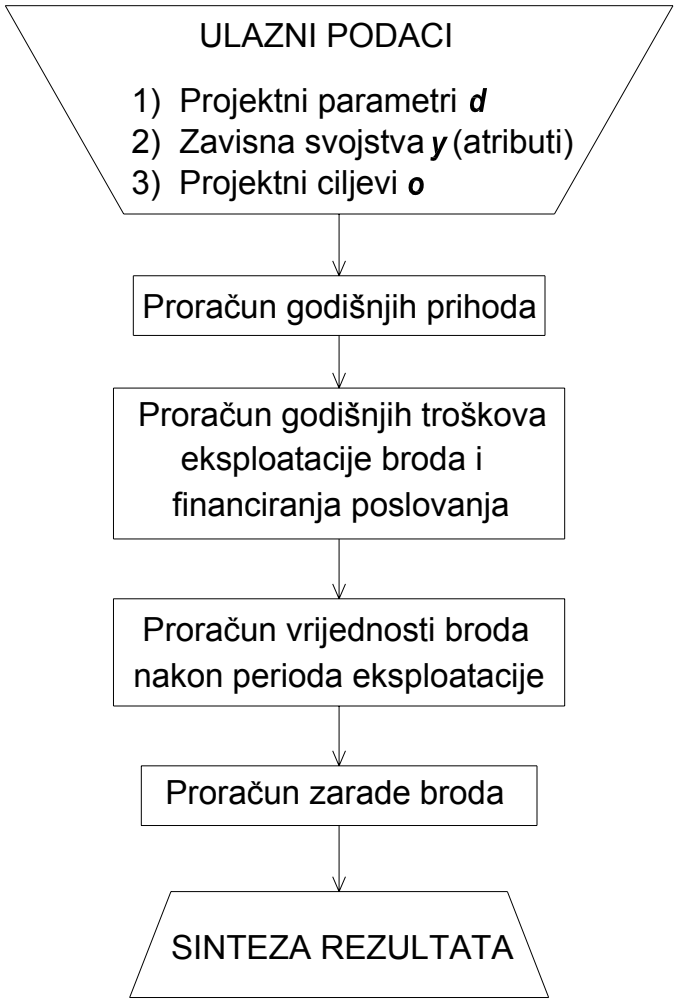
*LS* – vlastita masa broda (t),
$c_{scrap}$ – jedinična cijena otpadnog čelika (US$/t)

## 10.5 Rezultat poslovanja broda

U skladu s izloženim u točki 9.5, za rezultat poslovanja broda nakon zadanog perioda eksploatacije *P* (profit), možemo pisati:

$$P = C_{sh} - C_{nb} + T_{\exp}\left(R_{year} - C_{run}\right) \text{ (US\$)} \tag{10.15}$$

Ovako definirani profit broda je dodatni atribut u postupku višeatributnog optimiranja projekta broda. Matematički modul eksploatacije broda je prikazan sljedećom slikom.




Slika 21 Blok shema modula eksploatacije broda

10.6 Projektni parametri $\boldsymbol{d}_{exp}$, atributi $\boldsymbol{y}_{exp}\ (\boldsymbol{x},\boldsymbol{p})$ i ciljevi $\boldsymbol{o}_{exp}$

Nadalje su navedeni projektni parametri, zavisna projektna svojstva (atributi) i projektni ciljevi koji su vezani za eksploataciju trgovačkog broda.

1) Projektni parametri $\boldsymbol{d}_{exp} = \{C_{nb},\ C_{nb\text{-}stand},\ \boldsymbol{d}_{cost}\}$ se sastoje od rezultirajuće cijene novogradnje ($C_{nb}$), cijene „standardne novogradnje“ ($C_{nb\text{-}stand}$) i cijele skupine parametara koji su potrebni za izračun troškova eksploatacije broda ($\boldsymbol{d}_{cost}$):

   - cijena novogradnje $C_{nb}$ (US$),
   - cijena „standardne“ novogradnje $C_{nb\text{-}stand}$ (US$),
   - rok eksploatacije broda u godinama $T_{exp}$,
   - prosječna godišnja stopa deprecijacije vrijednosti broda *DEP*,
   - prosječna godišnja stopa inflacije *INF*,

- trajna snaga u službi porivnog stroja *CSR* (kW),
- specifična potrošnja porivnog stroja *SFOC* (t/kWh),
- jedinična cijena goriva $c_{fuel}$ (US$/t),
- dnevni prihod od eksploatacije $R_{day}$ (US$),
- godišnji broj dana u kojima je brod van najma $O_{year}$ (dan/god),
- godišnji troškovi:
    - posade $C_{crew}$ (US$),
    - zaliha i maziva $C_{stor}$ (US$),
    - tekućeg održavanja $C_{main}$ (US$),
    - osiguranja $C_{ins}$ (US$),
    - opći troškovi $C_{gen}$ (US$),
    - periodičnog održavanja $C_{dock}$ (US$),
    - troškovi lučkih pristojbi $C_{port}$ (US$),
    - troškovi remorkera i pilota $C_{tug}$ (US$),
    - troškovi kanala i plovnih putova $C_{can}$ (US$),
    - ukrcaja tereta $C_{load}$ (US$),
    - iskrcaja tereta $C_{un}$ (US$),
    - oštećenja tereta $C_{claim}$ (US$),
- broj dana koji brod godišnje:
    - plovi natovaren $T_{car}$ (dan/god),
    - plovi u balastu $T_{ball}$ (dan/god),
    - provede na ukrcaju tereta $T_{load}$ (dan/god),
    - provede na iskrcaju tereta $T_{un}$ (dan/god),
- dnevna potrošnja goriva pomoćnih strojeva:
    - u plovidbi natovarenog broda $FOCC_{aux}$ (t/dan),
    - u plovidbi natovarenog broda $FOCB_{aux}$ (t/dan),
    - kod krcanja broda $FOCL_{aux}$ (t/dan),
    - kod iskrcaja broda $FOCU_{aux}$ (t/dan),
- faktor smanjenja potrošnje goriva u balastu $f_{ball}$ (%),
- godišnja stopa kamate i/ili dividenda *INT* (%).

2) Zavisna svojstva (atributi) $\boldsymbol{y}_{exp}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{p})$

Rezultat poslovanja broda nakon zadanog perioda eksploatacije (profit) *P* je definiran kao projektni atribut.

3) Projektni cilj $\boldsymbol{o}_{exp}$

Projektni cilj koji proizlazi iz poslovanja broda je maksimiziranje profita. Ovaj cilj dopunjava prethodno definirane projektne ciljeve vezane uz gradnju broda. Promatrajući sa stajališta optimiranja projekta broda kroz određeni period njegove eksploatacije, ovaj je projektni cilj dominantan.

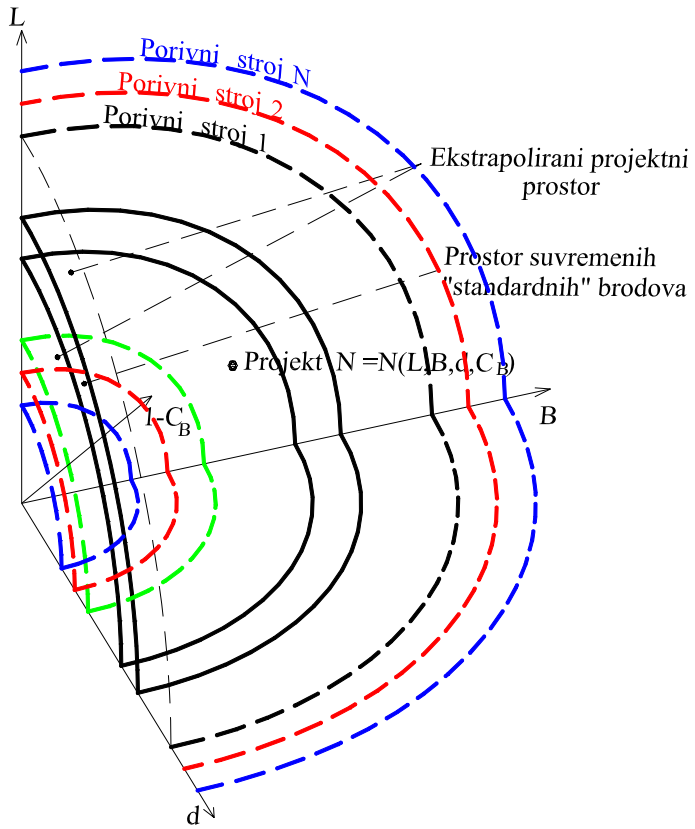
# 11 NOVA PROJEKTNA PROCEDURA OSNIVANJA TRGOVAČKOG BRODA

Osnove nove projektne procedure su iznesene u Poglavlju 4, a sama procedura je shematski prikazana na Slici 5. Izložena projektna procedura je podijeljena u dvije veće cjeline:

- Definiranje novog projektnog prostora,
- Optimizacija višeatributnom sintezom projekta.

## 11.1 Definiranje novog projektnog prostora

U cilju definiranja novog projektnog prostora treba zadati nova ograničenja minimalnih i maksimalnih vrijednosti pojedinih projektnih varijabli. U tu svrhu treba ispitati da li su moguće ekstrapolacije osnovnih izmjera broda ($L_{pp}$, $B$, $d_s$ i $C_B$) prema nižim i prema višim vrijednostima od onih koji su u praksi uobičajene, kao i odabir nekog drugog tipa porivnog stroja. Pri tome treba voditi računa o međusobnim odnosima i povezanosti osnovnih izmjera broda, te o posljedicama koje ekstrapolacija pojedine osnovne izmjere može imati po kvalitetu projekta. Princip ekstrapolacije projektnog prostora koji je na općem nivou prikazan Slikom 6, narednom je slikom prilagođen projektnim varijablama osnivanja broda.




Slika 22 Mogućnost proširenja projektnog prostora ekstrapolacijom projektnih varijabli

Da bi se novi projektni prostor kvalitetno definirao nužno je ostvariti suradnju projektanta broda koji kod ekspanzije projektnog prostora treba narinuti sva ograničenja projektnih varijabli koja proizlaze iz projektantskog iskustva i tehničko-tehnoloških ograničenja gradnje broda i eksperata iz pomorske kompanije koji narinjuju ograničenja vezana uz eksploataciju broda.

U ovoj fazi je moguće provjeriti ograničenja međusobnih odnosa svih osnovnih izmjera broda osim onih ograničenja u kojima je zastupljena visina broda. Ta se ograničenja mogu provjeriti tek nakon proračuna visine broda, jer je visina broda D funkcija osnovnih varijabli (izmjera broda) $L_{pp}$ i $B$, te projektnih parametara $V_{car}$ i $\kappa$. Stoga se ova provjera vrši u kasnijoj fazi, odnosno u matematičkom modulu osnivanja broda.

Prilikom određivanja novog projektnog prostora ukupni ekstrapolirani prostor (prikazan Slikom 22) treba podvrgnuti provjeri ograničenja međusobnih odnosa projektnih varijabli. Time se već u ovoj fazi izbjegava dio projektnih rješenja koji ne pripada ostvarivim projektima.

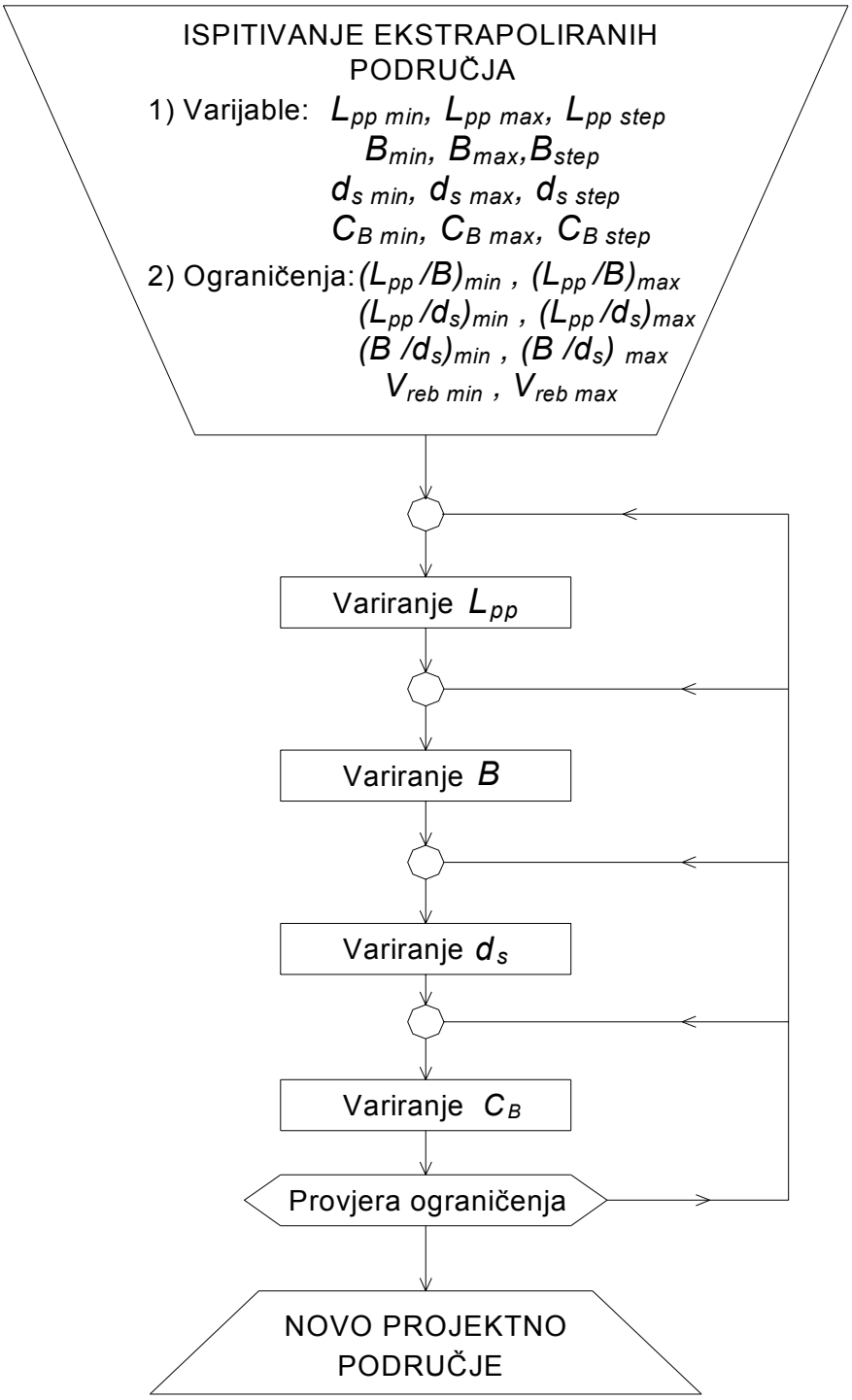
Dodatno ograničenje projektnog prostora proizlazi iz činjenice da se projektna rješenja mogu očekivati unutar nekih vrijednosti osnovnih svojstava projekta. Obzirom da je prilikom osnivanja broda poznata zahtijevana ukupna nosivost, te da se vlastita masa broda može približno odrediti, u ovom je slučaju moguće s dovoljnom točnošću odrediti minimalni i maksimalni iznos istisnine. Ovo ograničenje se može opisati narednim izrazom:

$$\Delta_{\min} \leq \gamma_{tot} L_{pp} B \cdot d_s C_B \leq \Delta_{\max} \tag{11.1}$$

gdje su:

$\Delta_{min}$ – minimalno očekivana istisnina na maksimalnom gazu (t)
$\Delta_{max}$ – maksimalno očekivana istisnina na maksimalnom gazu (t)
$\gamma_{tot}$ – specifična masa morske vode uključujući utjecaj oplate i privjesaka (t/m$^3$)

Princip zadavanja novog projektnog područja je prikazan sljedećom slikom.




Slika 23 Određivanje novog projektnog prostora

Rezultat provedbe ovog postupka je definiranje novog projektnog prostora, što je preduvjet za provedbu optimizacije projekta broda.

Kod određivanja porivnih strojeva koji dolaze u obzir za ugradnju na promatrani projekt, treba imati u vidu sljedeće činjenice:

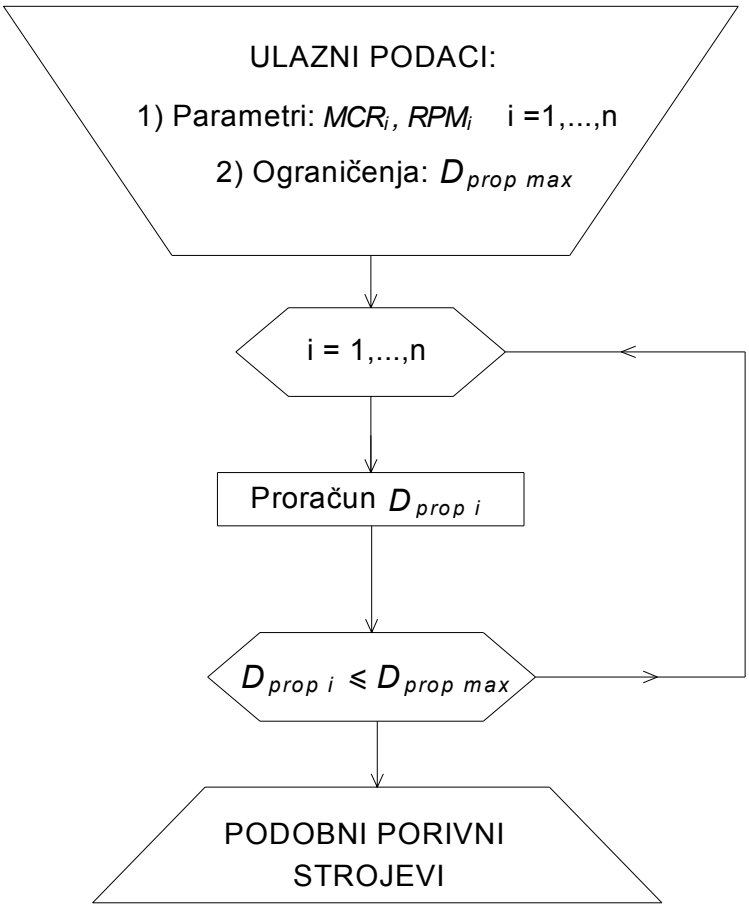
- maksimalna snaga pojedinog porivnog stroja $MCR_i$ mora biti veća ili jednaka minimalno zahtijevanoj snazi $MCR_{min}$,
- promjer projektiranog propelera $D_{prop\ i}$ (m) za zahtijevanu snagu, pripadne okretaje i broj krila propelera mora biti manji ili jednak promjeru maksimalno ugradivog propelera $D_{prop\ max}$ (m).

Ova se ograničenja mogu definirati kao:

$$MCR_i \geq MCR_{\min} \tag{11.2}$$

$$D_{prop\cdot i} \leq D_{prop\cdot \max} \tag{11.3}$$

Ispitivanje podobnosti porivnih strojeva koji ispunjavaju zahtjev za minimalnom snagom je prikazano sljedećom slikom.




Slika 24 Određivanje podobnih porivnih strojeva

Optimizacija višeatributnom sintezom projekta je druga velika cjelina projektne procedure prikazane Slikom 5. U daljnjem će tekstu biti izložena identifikacija projektnih varijabli, parametara i atributa koje su podloga za provedbu optimizacije metodom višeatributne sinteze projekta u optimiranju projekta broda.

## 11.2 Identifikacija projektnih varijabli $\boldsymbol{x} = \boldsymbol{x}_{dsgn}$

Projektne varijable se prenose iz matematičkog modula osnivanja trgovačkog broda opisanog u Poglavlju 8. Ovdje ćemo ih samo ponoviti:

- duljina među okomicama $L_{pp}$ (m),
- širina $B$ (m),
- maksimalni gaz $d_s$ (m),
- koeficijent punoće $C_B$ (-),
- volumen teretnog prostora $V_{car}$ ($m^3$),
- brzina broda $v_{tr}$ (čv),
- identifikator porivnog stroja $I_{me\,i}$ (-).

## 11.3 Identifikacija projektnih parametara $\boldsymbol{d} = \{\boldsymbol{d}_{dsgn}, \boldsymbol{d}_{exp}\}$

Projektni parametri se sastoje od dvije velike grupe:

- parametara koji proizlaze iz matematičkog modula osnivanja broda $\boldsymbol{d}_{dsgn}$,
- parametara koji proizlaze iz matematičkog modula eksploatacije broda $\boldsymbol{d}_{exp}$.

Detaljno su opisani u Poglavljima 8 i 10, a sljedećom tablicom su kratko rekapitulirani.

| Osnivanje broda | Eksploatacija broda |
|---|---|
| Zahtijevana ukupna nosivost $DW_{req}$ (t) | Cijena „standardne“ novog. $C_{nb\text{-}stand}$ (US$) |
| Zahtijevani vol. teret. prostora $V_{car\ req}$ ($m^3$) | Rok eksploatacije broda $T_{exp}$ (god) |
| Zahtijevana brzina $v_{tr\ req}$ (čv) | Stopa deprecijacije broda *DEP* (%) |
| „Specifična voluminoznost broda“ $\kappa$ (-) | Godišnja stopa inflacije *INF* (%) |
| Utjecaj čelika povišene čvrstoće $f_1$ (%) | Spec. potrošnja poriv. stroja *SFOC* (t/kWh) |
| Max. snage porivnih strojeva $MCR_i$(kW) | Jedinična cijena goriva $c_{fuel}$ (US$/t) |
| Cijene porivnih strojeva $C_{me\ i}$ (€) | Dnevni prihod od eksploatacije $R_{day}$ (US$) |
| Jedinična cijena čelika $c_{st}$ (US$/t) | Vrijeme broda van najma $O_{year}$ (dan/god) |
| Odnos bruto/neto mase čelika $c_{gwst}$ (-) | Trošak posade $C_{crew}$ (US$) |
| Cijena preost. mat. i opreme $C_{res}$ (€) | Trošak zaliha i maziva $C_{stor}$ (US$) |
| Proizvodnost $P_{cGT}$ (rs/cGT) | Trošak tekućeg održavanja $C_{main}$ (US$) |
| Jedinična satnica $v_{lab}$ (€/rs) | Troškovi osiguranja $C_{ins}$ (US$) |
| Preostali fiksni troškovi $C_{pt\ fix}$ (€) | Opći troškovi $C_{gen}$ (US$) |
| Udio varijabilnih troškova $c_{pt\ var}$ (%) | Trošak periodičnog održavanja $C_{dock}$ (US$) |
| Odnos €/US$ *ER* (-) | Trošak lučkih pristojbi $C_{port}$ (US$) |
| | Trošak remorkera i pilota $C_{tug}$ (US$) |
| | Trošak kanala i plovnih putova $C_{can}$ (US$) |
| | Trošak ukrcaja tereta $C_{load}$ (US$) |
| | Trošak iskrcaja tereta $C_{un}$ (US$) |
| | Trošak oštećenja tereta $C_{claim}$ (US$) |
| | Vrijeme plovidbe s teretom $T_{car}$ (dan/god) |
| | Vrijeme plovidbe u balastu $T_{ball}$ (dan/god) |
| | Vrijeme na ukrcaju tereta $T_{load}$ (dan/god) |
| | Vrijeme na iskrcaju tereta $T_{un}$ (dan/god) |
| | Potr. pom. stroj. - plov./teret $FOCC_{aux}$ (t/dan) |
| | Potr. pom. stroj. - plov./balast $FOCB_{aux}$ (t/dan) |
| | Potr. pom. stroj. - luka/ukrcaj $FOCL_{aux}$ (t/dan) |
| | Potr. pom. stroj. - luka/iskrcaj $FOCU_{aux}$ (t/dan) |
| | Faktor smanjenja potrošnje u balastu $f_{ball}$ (%) |
| | Godišnja kamata i/ili dividenda *INT* (%) |

Tablica 9 Projektni parametri ***d***

## 11.4 Identifikacija projektnih ograničenja $\boldsymbol{g} = \boldsymbol{g}_{dsgn}$

Projektna ograničenja su detaljno su opisana u Poglavlju 8. Sastoje se od dvije grupe: ograničenja koja proizlaze iz gonjih i donjih granica projektnih varijabli ($\boldsymbol{g}_{min\text{-}max}$ prikazana Tablicom 4) i min-max ograničenja međusobnih odnosa osnovnih izmjera ($\boldsymbol{g}_{ratios}$ prikazana Tablicom 5). Nadalje su kratko nabrojena:

- $L_{pp\ min}$, $L_{pp\ max}$, $B_{min}$, $B_{max}$, $d_{s\ min}$, $d_{s\ max}$, $C_{B\ min}$, $C_{B\ max}$, $V_{car\ min}$, $V_{car\ max}$, $v_{tr\ min}$, $v_{tr\ max}$,
- $(L_{pp}/B)_{min}$, $(L_{pp}/B)_{max}$, $(L_{pp}/d_s)_{min}$, $(L_{pp}/d_s)_{max}$, $(B/d_s)_{min}$, $(B/d_s)_{max}$, $(L_{pp}/D)_{min}$, $(L_{pp}/D)_{max}$.

## 11.5 Identifikacija projektnih atributa $\boldsymbol{y(x,d)} = \{\boldsymbol{y}_{dsgn}, \boldsymbol{y}_{exp}\}$

Zavisna projektna svojstva se također sastoje od dviju glavnih grupa:

- atributa koji proizlaze iz matematičkog modula osnivanja broda ($\boldsymbol{y}_{dsgn}$) ,
- atributa koji proizlaze iz matematičkog modula eksploatacije broda ($\boldsymbol{y}_{exp}$).

Atributi su detaljno opisani u Poglavljima 8 i 10. Kratko su rekapitulirani u narednoj tablici.

| Osnivanje broda | Eksploatacija broda |
|---|---|
| Postignuta ukupna nosivost $DW_{ach}$ (t) | Profit broda $P$ (US$) |
| Postignuti vol. teret. prostora $V_{car\ ach}$ ($m^3$) | |
| Postignuta brzina $v_{tr\ ach}$ (čv) | |
| Masa čelične konstrukcije $W_{st}$ (t) | |
| Snaga porivnog stroja $CSR$ (kW) | |
| Cijena materijala $C_{mat}$ (US$) | |
| Cijena rada (procesa) $C_{lab}$ (US$) | |
| Cijena novogradnje $C_{nb}$ (US$) | |

Tablica 10 Projektni atributi $\boldsymbol{y(x,d)}$

## 11.6 Identifikacija projektnih ciljeva $\boldsymbol{o} = \{\boldsymbol{o}_{dsgn}, \boldsymbol{o}_{exp}\}$

Projektni ciljevi također proistječu iz dvaju osnovnih matematičkih modula: modula osnivanja trgovačkog broda ($\boldsymbol{o}_{dsgn}$) i modula eksploatacije trgovačkog broda ($\boldsymbol{o}_{exp}$). Detaljno su opisani u Poglavljima 8 i 10, a sljedećom tablicom su kratko rekapitulirani.

| Osnivanje broda | Eksploatacija broda |
|---|---|
| Minimiziranje snage porivnog stroja | Maksimiziranje profita broda |
| Minimiziranje mase čelične konstrukcije | |
| Minimiziranje cijene ugrađenog materijala | |
| Minimiziranje cijene rada (procesa) | |
| Minimiziranje cijene koštanja broda | |

Tablica 11 Projektni ciljevi $\boldsymbol{o}$

# 12 METODA OPTIMIRANJA U OSNIVANJU TRGOVAČKOG BRODA

U ovom je radu korišten program za višeatributno optimiranje (MADM - multiattribute decision making) razvijen na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Primijenjena višekriterijska optimizacijska metoda je detaljno opisana u [28,29], i primijenjena u [12,13,14,15,18,22,23]. Njena primjena omogućava projektantu kvalitetno korištenje raspoloživog vremena: ispitivanje kvalitete pojedinih projektnih rješenja s obzirom na postignuta projektna svojstva (atribute), odnosno na analizu dobivenih nedominiranih projekata te koncentriranje na konačni izbor jednog od njih (preferirano rješenje).

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 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.

## 12.1 Opis matematičkog modela postupka donošenja odluke

Nadalje opisani matematičkog modela postupka donošenja odluke je preuzet iz [18]. Principi projektiranja zahtijevaju da su za dobar projekt (Aksiom I) kvalitete, koliko je god to moguće, nezavisne od parametara, te da su (Aksiom II) argumenti koji potvrđuju dobar projekt što jednostavniji [30].

Najbolji projekt (projekti)“ se može odrediti trima klasičnim načinima donošenja odluke [31]:

- leksikografskim popisom prioriteta (selekcija „najboljih“ kandidata se vrši prema cilju koji je prvi prioritet, zatim prema cilju koji je drugi prioritet, i tako nadalje)
- kreiranjem funkcije kvalitete (kombinacija funkcija atributa kao finalne mjere kvalitete)
- mjerenjem udaljenosti od zadane mete (zadavanjem metrike, odnosno mjerenja udaljenosti od ciljanog projekta, često utopije)

U nastavku su dane osnovne definicije prema [15] korištene u projektnoj proceduri.

Projektni prostor $\boldsymbol{X}$ je razapet slobodnim projektnim varijablama $x_i$, i=1,...,nv (Slika 25a). Svaki projekt k je predstavljen točkom $\boldsymbol{x}^k = \{x_i\}$ *(tj.* $x^2$ *ili* $x^P$*)* u ovom prostoru. Projekti u podprostoru (podskupu ako je k konačan) ostvarivih projekata $\boldsymbol{X}^{\geq}$ zadovoljavaju kriterije podobnosti, $g_i(\boldsymbol{x}) \geq 0$, proizvodne ili funkcionalne zahtjeve, min-max ograničenja $x_i^D$ i $x_i^G$ i sva ostala ograničenja. Treba napomenuti da $\boldsymbol{X}^{\geq}$ može biti konveksan (linija koja spaja dva projekta leži u $\boldsymbol{X}^{\geq}$), ali i ne mora biti, kao što je slučaj na Slici 25a.

Dimenzionalnost projektnog problema je zadana brojem varijabli *nv*. Dimenzionalnost i pristup rješavanju višedimenzionalnih problema su obrađeni u [32]. Kod konceptualnog projekta broda broj varijabli se kreće *nv* ~ 4 – 20, a kod preliminarnog/inicijalnog projekta brodske strukture se kreće do *nv* ~ 200/1000.

Prostor atributa $\boldsymbol{Y}$ (Slika 25b) je razapet projektnim atributima $y_i$. Preslikavanja $\boldsymbol{y}^k = \boldsymbol{a}(\boldsymbol{x}^k)$ ili $\boldsymbol{a}$: $\boldsymbol{X}^{\geq} \rightarrow \boldsymbol{Y}^{\geq}$ su upotrebljena da bi se formirao prostor atributa $\boldsymbol{Y}^{\geq} = \{\boldsymbol{y}^k\}$. Svakom ostvarivom projektu $\boldsymbol{x}^k$ iz $\boldsymbol{X}$ odgovaraju vrijednosti atributa (projektnih svojstava, odnosno kvaliteta) $\boldsymbol{y}^k = \{\boldsymbol{y}_i\}$ definirane pripadnom točkom u prostoru $\boldsymbol{Y}$. Treba istaknuti da se više različitih točaka (projekata) iz $\boldsymbol{X}$ prostora može preslikati u istu točku $\boldsymbol{Y}$ prostora.

Dodatno, $x_i$ ili $y_j$ vrijednosti nisu međusobno usporedive i različitih su mjernih jedinica, pa stoga $\boldsymbol{X}$ i $\boldsymbol{Y}$ nisu metrički prostori, odnosno, nemoguće je izmjeriti udaljenost između pojedinih projekata. Usporedba pojedinih projekata je moguća samo obzirom na pojedinu varijablu $x_i$ ili pojedini atribut $y_j$.

U slučaju kad se optimizacija provodi u smjeru poboljšanja kvalitete (npr. minimalna cijena ili maksimalna sigurnost) projektni atributi postaju projektni ciljevi. Utopija $\boldsymbol{y}^*$ (idealni projekt) je projekt s koordinatama najboljih postignutih svojstava za svaki projektni cilj ponaosob. Obično je neostvariva.

Koncept nedominiranosti je prikazan na Slici 25a, 25b. Podprostor $\boldsymbol{Y}^N$ nedominiranih (Pareto fronta optimalnih, odnosno efikasnih projekata) može biti identificiran nakon što se projekti (točke) u $\boldsymbol{Y}^{\geq}$ podvrgnu strukturi projektantovih subjektivnih preferencija. Nakon toga su samo ti projekti (obično mali dio ostvarivih projekata) zanimljivi projektantu budući da oni dominiraju svim ostalim ostvarivim projektima.

Preferencija je odnos među dvama atributima kojim se definira da je projekt $\boldsymbol{y}^i$ preferiran projektu $\boldsymbol{y}^j$. „Bolji skup“ može biti definiran u odnosu na zadani (referentni) projekt $\boldsymbol{y}^0$ ako su svi njegovi elementi preferirani elementima projekta $\boldsymbol{y}^0$. Obrnuto, „lošiji skup“ se može formirati tako da sadrži sve projekte koji su lošiji od projekta $\boldsymbol{y}^0$ po svim atributima, odnosno da su dominirani od strane $\boldsymbol{y}^0$. Za oblik preferencije „više je bolje“ lako je predočiti „lošiji skup“ projekta $\boldsymbol{y}^P$ (Slika 25b), koji sadrži točke lijevo od linije $y_1^P$ i ispod linije $y_2^P$. Konačno, skup nedominiranih projekata $\boldsymbol{Y}^N$ je definiran kao skup projekata od kojih nema „boljeg skupa“, odnosno nisu dominirani od bilo kojeg projekta.

Također se može reći da je projekt nedominiran ako je barem u nekom cilju bolji od bilo kojeg projekta iz $\boldsymbol{Y}^{\geq}$. [12]. Točkama u $\boldsymbol{Y}^N$ pripadaju projektne varijable iz $\boldsymbol{X}^N$ (Slika 25a). Opisani Pareto koncept se upotrebljava u većini današnjih višekriterijskih optimizacijskih postupaka.

Realistično donošenje odluke mora uključiti subjektivnost onih koji odluku donose (njihova različita stajališta), posebno kod novih, inovativnih projekata. Projektni ciljevi i mjere kvalitete projekta su najbolje prostoru atributa, ali je donošenje odluke komplicirano zbog nepostojanja metrike. Uključivanje subjektivnosti je osnova za realistično donošenje odluke (Slika $25b_1$ i $25b_2$). To podrazumijeva:

- Subjektivna usporedba različitih projekata se može provesti upotrebom neizrazitih funkcija $U_i(y_i)$. Stupanj zadovoljstva $\mu_i = U_i(y_i)$ ima raspon od 0 do 1 (isprekidana linija na Slici $25b_1$ i $25b_2$). Kod problema vibracija ova se funkcija može sastojati od tzv. serije inverznih zvonastih funkcija pozicioniranih na frekvencijama uzbude ($\mu_i = 0$ za projekt u rezonanci) Ovaj koncept je u širokoj upotrebi u procesima za potporu pri donošenju odluke (DSP – „Decision Support Process“).
- Subjektivni značaj pojedinih atributa se može zadati pomoću težinskih faktora $w_i$. Koncept zadavanja preferencija je opisan u [12, 32, 33].
- Vrednovanje projektnih atributa se može provesti kombiniranjem prethodnih subjektivnosti, odnosno u obliku produkta $u_i(y_i) = w_i\, U_i(y_i)$.

Subjektivni normalizirani prostor (Slika 25c) je formiran pomoću preslikavanja $\boldsymbol{u}: \boldsymbol{Y}^{\geq} \rightarrow \boldsymbol{M}^{\geq}$ čime je ostvarena mogućnost uvođenja metrike (mjerenja udaljenosti) pošto su vrijednosti svih atributa $m_i = u_i(y_i)$ normalizirane i skalirane prema svom relativnom značaju. Funkcije subjektivnih kriterija $\boldsymbol{u}$ omogućavaju prirodnu „više je bolje“ strukturu preferencija i olakšavaju filtriranje podskupa nedominiranih projekata $\boldsymbol{M}^N$ *iz* $\boldsymbol{M}^{\geq}$ i generiranje odgovarajućih $\boldsymbol{Y}^N$ *i* $\boldsymbol{X}^N$.

Vrijednost (subjektivno zadovoljstvo) i funkcije kvalitete projekta **v** [31] su definirane preko preslikavanja $l_i = v_i\ (\boldsymbol{m})$. N-torka $\boldsymbol{l}^K = \{l_i\}$ sadrži vrijednosti koje su dobivene različitim funkcijama vrijednosti i korisnosti (value functions i utility functions) i u sebi

sadrži formulaciju subjektivnosti projektanta i ostalih koji sudjeluju u donošenju odluke. Linija istih vrijednosti $l_i$ = konst. može se prikazati u $\boldsymbol{M}$ prostoru. Ove linije (slično kao u geografiji) mogu iskazati višestruke vrhove. Neki od ovih vrhova odgovaraju lokalnim minimumima/maksimumima, a neki su globalni, odnosno najbolji u cijelom $\boldsymbol{M}^{\geq}$ prostoru. Treba napomenuti da se optimum u jako ograničenim prostorima često nalazi na rubovima ostvarivog područja.

Norme udaljenosti (metrika) $L_p$ se često koriste kao funkcije vrijednosti projekata. Udaljenost od zadanog ciljanog projekta m* (tj. idealnog projekta ili utopije) je zadana sljedećim izrazom:

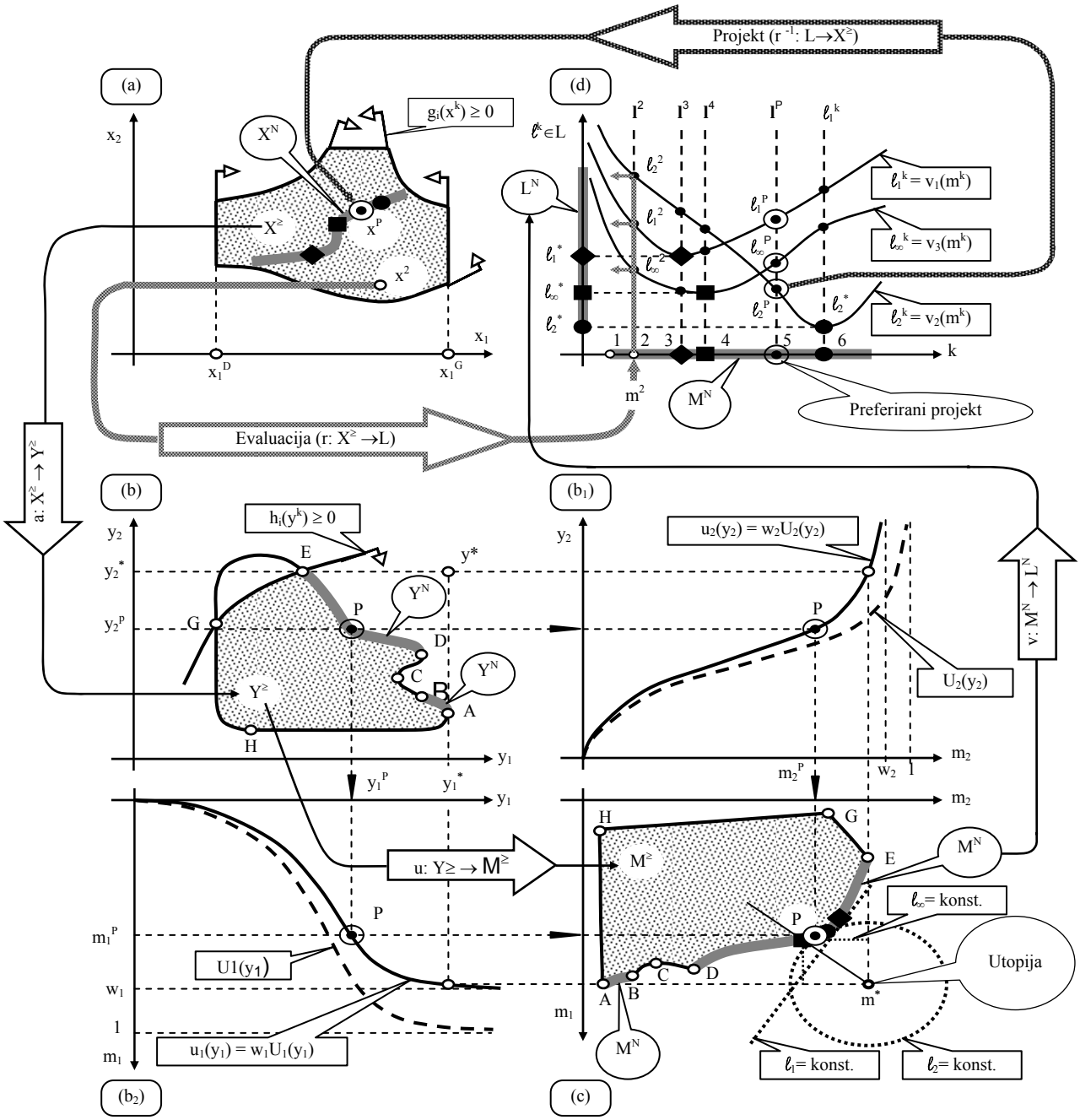
$$l_i \equiv L_p\,(\boldsymbol{m}^k) = [\Sigma|m_i^k - m_i^*|^p]^{1/p} \qquad (12.1)$$

Za eksponent p u definiciji norme se može uzeti 1 (Metropolitanska norma), 2 (Euklidova norma) ili $\infty$ (Čebiševljeva norma). Linije iste udaljenosti za pojedine norme su (Slika 25c):

- ravne linije $\Sigma m_i$ = konst. za $L_1$ metriku,
- kružnice oko $\boldsymbol{m}^*$ za $L_2$ metriku i
- $m_i$ = konst. za $L_\infty$ metriku.

Nedominirani projekt s minimalnom udaljenošću od utopije prema $L_\infty$ (označen s ■) možemo smatrati tzv. „neizrazitim optimumom“, odnosno, može se reći da je projekt s minimalnim maksimalnim odstupanjem $m_i$ iz $\mathbf{m}^k$ optimalan. Norme se upotrebljavaju u mnogim radovima [33,34].

Odabir preferiranog projekta je prikazan Slikom 25d. Da bi se izvršio izbor preferiranog projekta $\boldsymbol{d}^p = \{\boldsymbol{x}^p, \boldsymbol{y}^p, m^p, \boldsymbol{l}^p\}$ izračunaju se vrijednosti $\boldsymbol{l}^k$ za sve projekte u $\boldsymbol{M}^N$. Obzirom da se konačna odluka donosi isključivo na osnovi $\boldsymbol{l}^k$, svi se $l_i$ mogu postaviti na istu koordinatnu os za svaki projekt k. Da bi se olakšalo donošenje konačne subjektivne odluke svi promatrani projekti mogu se prikazati skupom paralelnih osi. U tom slučaju posebnim linijama povezujemo svaku vrijednosnu funkciju $l_i$. Skup paralelnih osi može se također odnositi i na sve $l_i$, pa se u tom slučaju pojedini projekti povezuju posebno označenim linijama. Time je olakšano raspoznavanje pojedinih projekata, njihovo vrednovanje i rangiranje.




Slika 25 Projektni problem [15]

## 12.2 Tehnike subjektivnog donošenja odluke

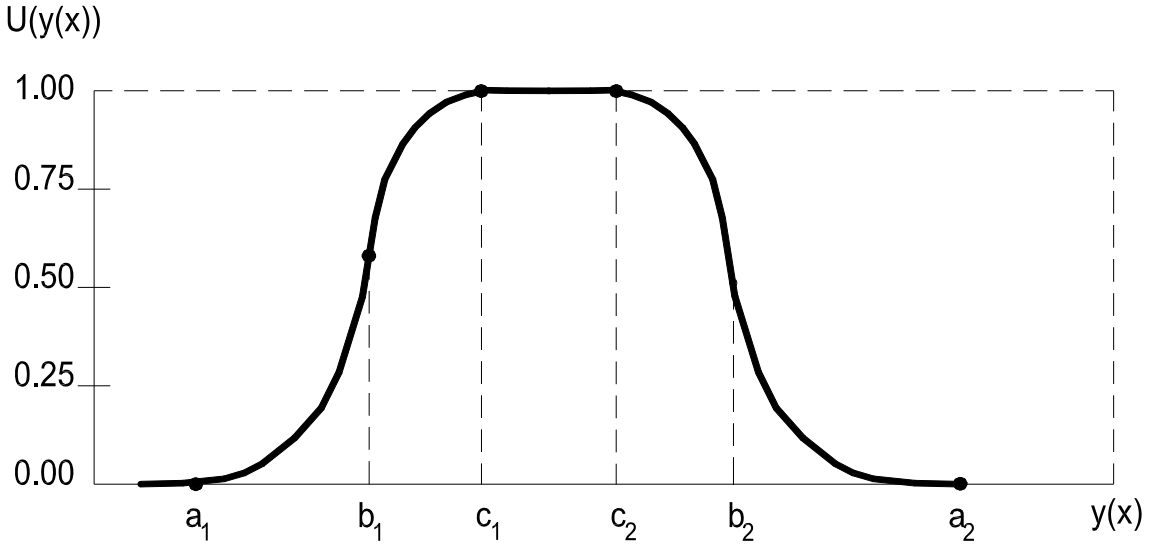
Prethodno opisani prostor subjektivne metrike zasniva se na subjektivnim preferencijama i uvjerenjima svih onih koji sudjeluju u donošenju konačne odluke. To implicira usporedbu projekata u okviru svakog pojedinog atributa (unutar atributne preferencije) i zadavanje međusobnog odnosa značaja pojedinih atributa (međuatributne preferencije)

### 12.2.1 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 - privlačenje).

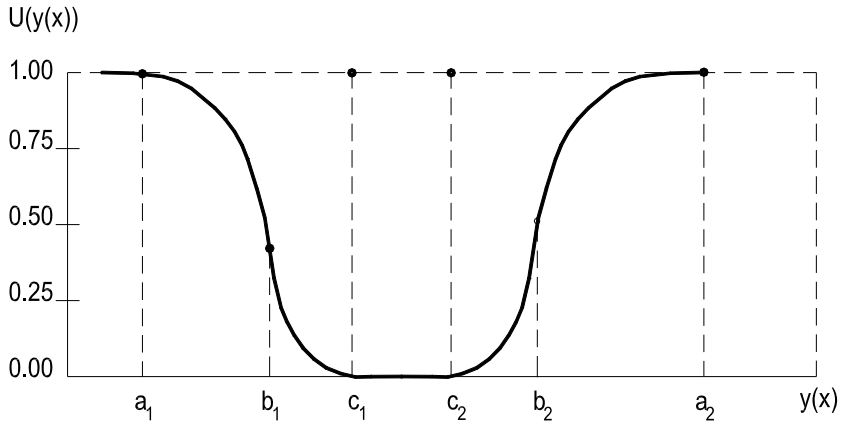



Slika 26 "Ω" oblik neizrazite funkcije (privlačenje) [12]

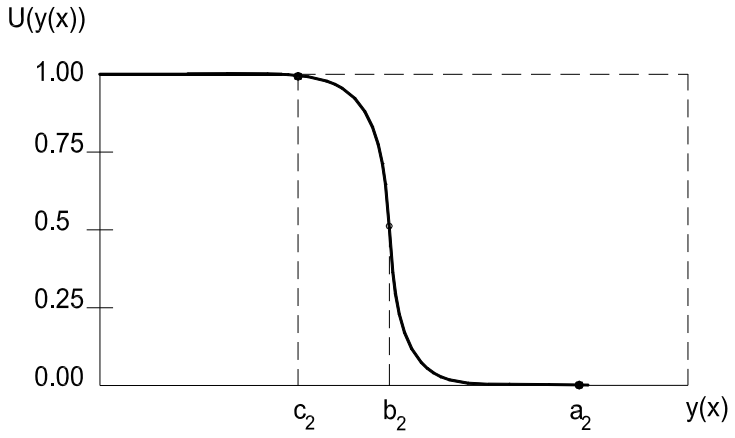
Opći oblik neizrazite funkcije je definiran sljedećim polinomskim skupom [26]:

$$U(y(x)) = \begin{bmatrix} 0 & \text{ako je } y < a_1 \\ (y-a_1)^2/[(b_1-a_1)(c_1-a_1)] & \text{ako je } a_1 < y < b_1 \\ 1 - (y-c_1)^2/[(c_1-b_1)(c_1-a_1)] & \text{ako je } b_1 < y < c_1 \\ 1 & \text{ako je } c_1 < y < c_2 \\ 1 - (y-c_2)^2/[(b_2-c_2)(a_2-c_2)] & \text{ako je } c_2 < y < b_2 \\ (y-a_2)^2/[(a_2-b_2)(a_2-c_2)] & \text{ako je } b_2 < y < a_2 \\ 0 & \text{ako je } a_2 < y \end{bmatrix} \quad (12.2)$$

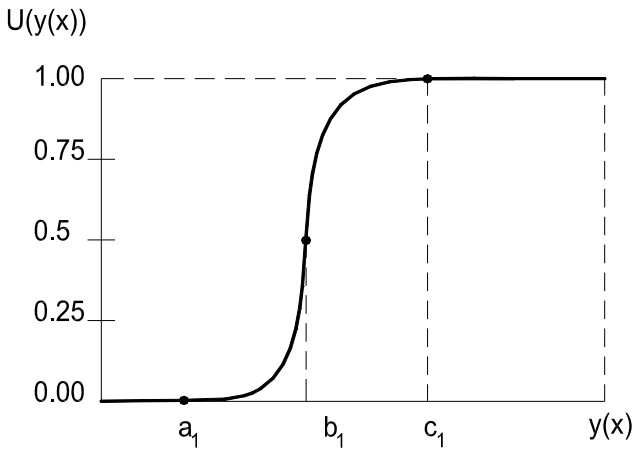
Osim prethodno opisanog općeg ("Ω") oblika funkcije, moguća je primjena i drugih oblika: "U" oblika (kad izbjegavamo pojedino područje), "S" oblika (kad gornja granica nije zadana) I "Z" oblika (kad nije zadana donja granica). Ovi su oblici principijelno prikazani sljedećim slikama.




Slika 27 "U" oblik neizrazite funkcije (odbijanje) [14]




Slika 28 "Z" oblik neizrazite funkcije (silazni oblik) [14]




Slika 29 "S" oblik neizrazite funkcije (uzlazni oblik) [14]

12.2.2 Određivanje preferencija među pojedinim atributima

Relativni odnos značaja pojedinih atributa je pitanje subjektivne procjene. U ovom je radu korištena Saaty-eva AHP 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.

| Međusobni odnos atributa *i* i atributa *j* | $P_{ij}$ | |
|---|---|---|
| | atribut *i* preferiran | atribut *j* preferiran |
| Podjednako značajni | 1 | 1 |
| Diskretno preferiran | 3 | 1/3 |
| Jako preferiran | 5 | 1/5 |
| Izrazito preferiran | 7 | 1/7 |
| Potpuno preferiran | 9 | 1/9 |

Tablica 12 Definicija odnosa među atributima prema Saaty-u [18]

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

$$\boldsymbol{P} = [P_{ij}] \tag{12.3}$$

gdje je $P_{ij}$ značaj atributa *i* / značaj atributa *j*, odnosno:

$$P_{ij} = \frac{p_i}{p_j} \qquad i, j = 1,..NA \text{ (broj atributa)} \tag{12.4}$$

Relativni značaj pojedinog atributa je izražen pripadnim težinskim faktorom. N-torka značaja atributa je definirana kao:

$$\boldsymbol{p} = \{p_i\} \tag{12.5}$$

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

$$\boldsymbol{P}\cdot\boldsymbol{p} = NA\cdot\boldsymbol{p} \tag{12.6}$$

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 normalizirana vlastita n-torka koja odgovara najvećoj vlastitoj vrijednosti $\lambda_{max}$ sljedećeg problema vlastite vrijednosti:

$$(\boldsymbol{P} - \lambda\, \boldsymbol{I})\, \boldsymbol{p} = 0 \tag{12.7}$$

gdje su:

$\lambda_i$ - vlastite vrijednosti problema (i = 1,...NA)
***I*** - jedinična matrica

Stupanj konzistentnosti se određuje sljedećim kriterijem:

$$C = (\lambda_{max} - NA) / (NA - 1) \qquad \text{s preporukom da bude} < 0.1 \tag{12.8}$$

Alternativno se težinski faktori mogu definirati preko normalizirane geometrijske sredine pripadnog reda matrice preferencija, odnosno:

$$w_i = (\Pi_{j=1,..,NA}\, p_{ij})^{1/NA} \tag{12.9}$$

Prilikom provođenja optimizacijskog postupka nužno je posvetiti dužnu pažnju pitanju osjetljivosti, odnosno robustnosti matematičkog modela. To je naročito izraženo kod rješavanja tehničkih sistema gdje se, u pravilu, može garantirati postojanje projektnog rješenja, ali ne i njegova jedinstvenost i stabilnost. Mnogi su parametri, iako se smatraju konstantnim tijekom provedbe optimizacijskog postupka, nedovoljno točno zadani, što uzrokuje variranje vrijednosti u skupu kriterija ***Y*** i/ili prekoračenje ograničenja (neostvarivi projekti). Robustnost je definirana kao neosjetljivost (ili stabilnost) na takve promjene.

Metrika koju je razvio Taguchi [35,36] je zadana omjerom srednje vrijednosti atributa $y_{mi}$ i standardne devijacije $\sigma_{yi}$ kao posljedice neizvjesne vrijednosti parametara. Može se

reći da je to, u stvari, omjer predvidljivog i nepredvidljivog. Relativni značaj pojedinih parametarskih efekata se definira kao „omjer signala i šuma“, odnosno:

$$SNR_i = 20 \log (y_{mi}/\sigma_{yi}) \tag{12.10}$$

Robustnost [32,37,38] i neizvjesnost [39] se pojavljuju kao standardni koncept u suvremenom optimiranju projektnih problema.

## 12.3 Manipuliranje projektnim problemom i strategije rješavanja [15]

Preslikavanje projekta je prikazano na Slici 25a, 25d. Kompozitna funkcija vrijednosti (subjektivnog zadovoljstva projektanta) $l_i = r_i (\boldsymbol{x}^k)$, proizašla iz subjektivnih funkcija kriterija $r_i (\boldsymbol{x}^k) \equiv v_i(\boldsymbol{u}(\boldsymbol{a}(\boldsymbol{x}^k)))$, preslikava (mapira, pridružuje) podprostor ostvarivih projekata $\boldsymbol{X}^{\geq}$ u skup projekata $\boldsymbol{L}$ odabranih od strane projektanta. Postignute vrijednosti atributa $\boldsymbol{l}^k$ (cijena, težina, itd.) se koriste pri konačnoj ocjeni projekta. Opisano preslikavanje $\boldsymbol{r}: \boldsymbol{X}^{\geq} \rightarrow \boldsymbol{L}$ se naziva preslikavanjem za konačnu ocjenu (izbor).

Međutim, zadatak projektanta je da u projektnom prostoru odredi vrijednosti projektnih varijabli $\boldsymbol{x}^A$ za postizanje željenih (ciljanih) iznosa pojedinih atributa $\boldsymbol{l}^A$. Zbog toga je neophodno nužno provesti inverzno preslikavanje $\boldsymbol{r}^{-1}: \boldsymbol{l}^A \rightarrow \boldsymbol{X}^{\geq}$.

U realnim projektnim problemima se gotovo uvijek pojavljuju preslikavanja kod kojih nema inverznih funkcija $r_i^{-1}$ za inverzno povezivanje $\boldsymbol{x}^A = r_i^{-1}(\boldsymbol{l}^A)$, pa je moguće izraditi samo tzv. „inverzna slika“. To se događa zbog sljedećih problema:

- $x_i$ je često diskretna vrijednost ili cjelobrojna vrijednost,
- kriterijski skup može sadržavati nelinearne funkcije ili čak procedure,
- težinski faktori $w$ mogu imati višestruke vrijednosti, pošto su zadane od svih sudionika u postupku donošenja odluke,
- domena ostvarivih projekata $\boldsymbol{X}^{\geq}$ je nekonveksna i često višestruko povezana (problemi vibracija),
- nije moguće ostvariti uvid u projektni prostor.

Mogućnost uvođenja nove generacije tehnika optimiranja sumirana je u [29] prema [40] vezano uz očekivane smjerove razvoja odnosno prema [41] po pitanju negradijentnih metoda. Osnovni trendovi su:

- Višekriterijsko odlučivanje (MCDM – „Multiple Criteria Decision Making“) je prihvaćeno kao jedini prihvatljivi generalni pristup. Izbor višeatributne (MADM – „Multi Attribute“) ili višeciljne (MODM – „Multi Objective“) formulacije ovisi o dimenzionalnosti i matematičkoj složenosti problema.
- Povećanje brzine kompjutera je omogućilo generiranje velikog broja projektnih varijanti. Za rješavanje ovakvih problema značajan je i razvoj paralelnog procesiranja kod suvremenih kompjutera.

- Meta-modeliranje kriterijskih funkcija ili cjelokupnih podprostora (npr. $\boldsymbol{X}^N$) je omogućilo zadavanje jednostavnijih (za izračun jeftinijih) aproksiksimacija složenijih (za izračun skupljih) kompjuterskih analiza, i to upotrebom:
  1) odzivna ploha [42],
  2) neuralnih mreža [41],
  3) kriging [32].

  Neuronske mreže su poseban oblik odzivnih ploha koje koriste sigmoidnu funkciju. Ostale tehnike su izložene u [43].
- Sinergijska višedisciplinarna optimizacija (MDO – „Multi Disciplinary Optimization“) [44] kombinira parametre i kriterije iz hidrodinamike, strukture, proizvodnje itd.

### 12.3.1 Strategija rješavanja MADM pristupom

Izbor najboljeg projekta se vrši između određenog broja projektnih alternativa pomoću unapred definiranog sustava vrednovanja. Povećana brzina rada kompjutera je omogućila da se složeni projektni problemi modeliraju kao složeni proces procjenjivanja projekata pomoću namjernog zadavanja velikog broja projektnih varijabli. To se može izvesti metodom enumeracije ili metodama randomiziranog (slučajnog) pretraživanja kao najjednostavnijim i najrobustnijim negradijentnim tehnikama. Ako se nedominirane točke uspiju generirati dovoljno gusto može se definirati inverzno preslikavanje (mapiranje) nužno za vrednovanje projekata u najzanimljivijim područjima projektnog prostora.

Zbog toga je moguće MODM pristup optimizacijskom postupku zamijeniti višeatributnim optimizacijskim postupkom MADM („Multi Attribute Decision Making“). To podrazumijeva generiranje, procjenu i filtriranje nedominiranih projekata u pridruženom (afinom) prostoru i konačni odabir projekta u normaliziranom prostoru. Na ovaj način se izbjegava primjena analitičkih metoda a problem diskretnih varijabli i nepovezanih domena postaje irelevantan. MADM pristup je posebno efikasan u fazi konceptualnog projekta i u projektima podsistema u preliminarnoj i inicijalnoj fazi razvoja.

Generiranje projekata i strategija procjenjivanja: Neke MADM metode i njihove kombinacije za generiranje dobrih početnih projekata (npr. na nedominiranim hiper-plohama $\boldsymbol{X}^N$, $\boldsymbol{Y}^N$ ili $\boldsymbol{M}^N$) će nadalje biti opisane. Klasične determinističke metode pretraživanja (npr. Nelder-Mead simpleks strategija koja se koristi i u MODM) mogu također biti primijenjene, naročito za pretraživanje oblika projektnog prostora. Mogu se primijeniti različite lokalne i globalne metode pretraživanja, a može se očekivati i pojava njihovih hibrida, npr [29,45].

Nadalje će, kao primjer, biti izloženo šest različitih pristupa stohastičkog pretraživanja navedenih u DeMak dokumentaciji [46]. Pojavljuje se novi obrazac provođenja proračuna u kojem se slijede realni procesi („superiorni projektant“), a u skladu s tim su modelirane tri posljednje izložene metode. Ove su metode također i robustnije u odnosu na problem lociranja lokalnih minimuma.

(S1) Uzorkovanje Monte Carlo metodom u projektnom prostoru generira n nedominiranih projekata iz t pokušaja. Koristi se kao start u S2 i S3, te za višestruke startne točke u MODM.

(S2) Sekvencijalno adaptivno generiranje nedominiranih projekata [12] podrazumijeva provjeru dominiranosti ostvarivih projekata u Pareto smislu. Oni koji su nedominirani se koriste kao centri podprostora (miniprostora) u projektnom prostoru za daljnju sekvencijalnu (lančanu) generaciju nedominiranih kandidata za završni odabir projekta [34]. Primjenjuje se paralelno procesiranje. Osnovne razlike u odnosu na S1 su prilagodljive granice kao funkcije trenutnih nedominiranih točaka $\boldsymbol{x}^k$.

(S3) Faktorski pokusi (FFE – „Fractional Factorial Experiments“) upotrebljava ortogonalna polja (OA – „Orthogonal Arrays“) konstruirane na osnovi latinskih kvadrata [36]. Upotrebljava se za efikasno generiranje projekata i dokazano je efikasna metoda u višim ciklusima adaptivnog generiranja projekata u podprostoru oko nedominiranih projekata. Broj faktora (varijabli, parametara) iznosi od 2 do 5. U najčešćoj upotrebi su ortogonalna polja (npr. L9, L27) s tri nivoa koji mogu obrađivati do 8, odnosno 13 projektnih varijabli. Oni omogućavaju paralelno efikasno generiranje odzivnih ploha, npr. [32].

(S4) Genetički algoritmi (GA) uključuju:

a) križanje, tj. izmjenu dijelova kromosomske strukture (traka decimalnih ili binarnih projektnih varijabli **x**),
b) mutacija kromosomske strukture,
c) statistička selekcija preostalih projekata.

Genetički algoritmi su modelirani tako da slijede prirodnu selekciju s darvinističkim preživljavanjem najsposobnijih [47], što korespondira randomiziranom (slučajnom) adaptivnom pretraživanju. Razlikuju se od S1-S3 po kodiranju (šifriranju) skupa parametara, a ne prema samim parametrima. Za određivanje prikladnosti projekta upotrebljavaju se probabilistička, a ne deterministička prijelazna pravila.

Kod vrlo složenih višekriterijskih optimizacija, npr. [41], upotrebljavaju se višestepene metode i paralelno procesiranje generičkih algoritama.

Modeliranje imunološkog aparata, npr. [48], s antigenskim trakama (vrpcama) i generiranim vrpcama antitijela može se koristiti za koordiniranje podsustava unutar cjelokupnog sustava. Funkcija prikladnosti se dobiva usporedbom vrpci i analizom da li međusobno odgovaraju, s pristupom „bit-by-bit“ (po pojedinim elementima).

(S5) Strategije evolucije (ES – „Evolution Strategies“) su slične S4, ali križanje nije jako važno, npr. [49]. Strategije S4 i S5, slično kao i kod S2, pretražuju skupine točaka, a ne pojedine točke (jedna generacija se rekombinira da bi se stvorila nova generacija). Različite spoznajne (heurističke) metode („taboo“ pretraga, ekspertni i klasifikatorski sistemi) se mogu koristiti za usmjeravanje i vođenje projektnog procesa tako da se već razvijena skupina projekata koristi za razvoj novih pravila i/ili aktivnosti [41].

(S6) PSO („Particle Swarm“) algoritmi operacije nad populacijom inspirirane su inteligencijom roja pčela. Osnovna ideja PSO algoritma proizlazi iz činjenice da na kretanje (let) svake pojedinačne čestice u cijeloj populaciji (roju) kroz projektni i atributni prostor utječu najbolji projekti (lokacije) nađen do trenutne

iteracije od strane same čestice i cijelog roja. Iako u svojoj osnovi PSO algoritam nije predviđen za rad s višekriterijalnim problemima, kroz proteklo desetljeće razvili su se brojni PSO algoritmi koji to omogućuju. Osnovni problem je što kod višekriterijalnih problema svaka čestica ima skup nedominiranih rješenja iz kojeg mora odabrati svog lokalnog i globalnog vodiča što naravno mnogostruko komplicira problem, gdje kod jednokriterijalnih problema postoji samo jedan vodič.

Strategije S1-S6 se upotrebljavaju u kombinacijama s predvidljivim zadatkom pomoću tehnika meta-modeliranja. Paralelno procesiranje je lako primjenjivo na strategijama S1-S6 na način nezavisnog generiranja ostvarivih projekata. Algoritamska paralelnost procesora može ubrzati postupak filtriranja nedominiranih projekata, odnosno selekciju populacije u genetičkim algoritmima.

Pošto su strategije S4-S6 u osnovi optimizacijske tehnike bez ograničenja, skup ograničenja $\boldsymbol{g(x)}$ se mora dodatno uključiti. Upotrebljavaju se posebne procedure, npr. [50] ili pristup pomoću penalnih funkcija $r^P(\boldsymbol{x}) = r(\boldsymbol{x}) + F(\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}))$. Funkcija $F$ penalizira ciljeve u odnosu na nivo zadovoljenja ograničenja. Simulacija imunološkog mehanizma (popravak gena) se također koristi u strategijama S4-S5 u svrhu generiranja ostvarivih „kćeri“ projekata [42].

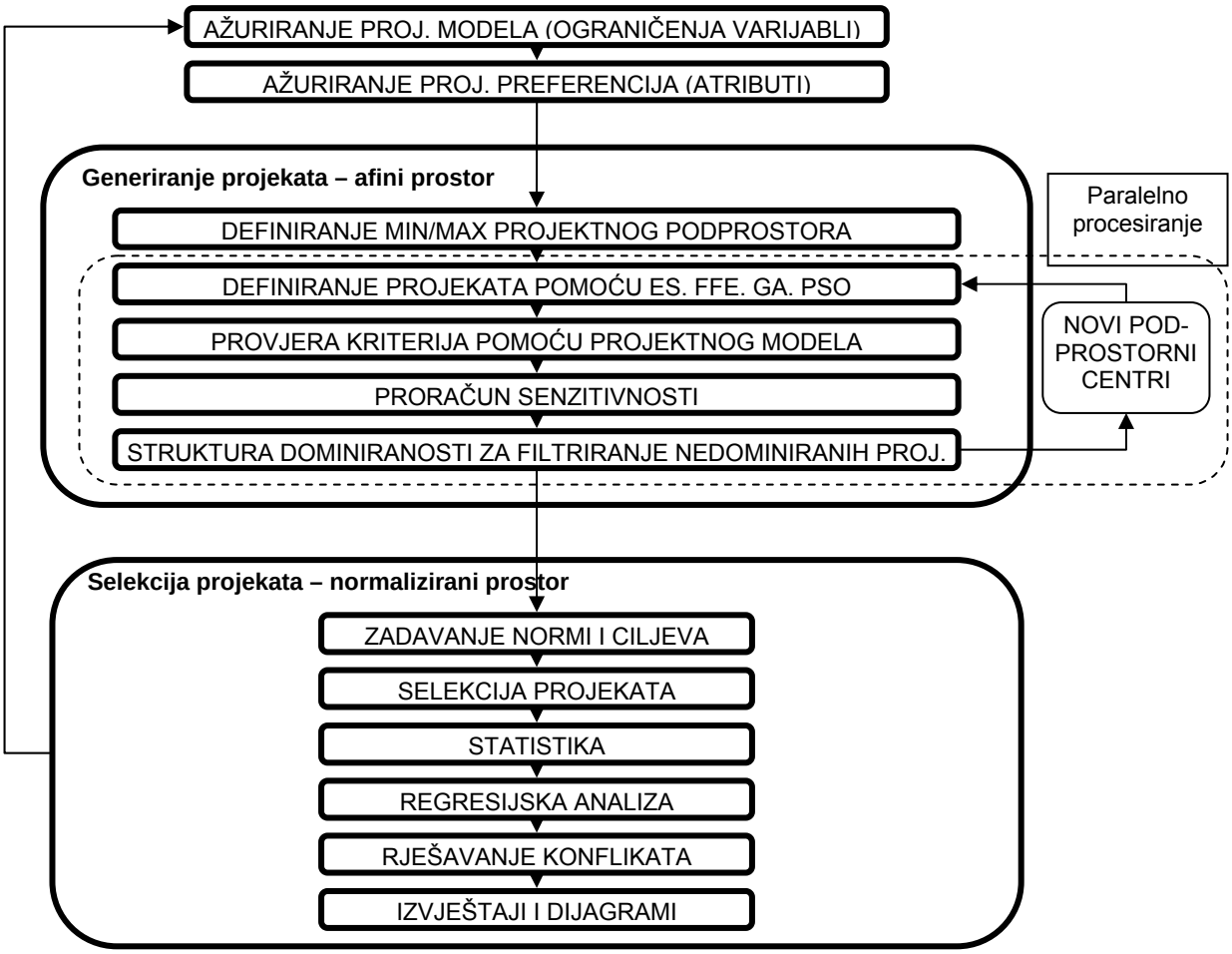
Strategije selekcioniranja podrazumijevaju jednostavan i brz izračun $\boldsymbol{L}^N$ za poznati $\boldsymbol{M}^N$. Problem minimiziranja se tako svodi na jednostavnu usporedbu vrijednosti $\boldsymbol{l}^K$. Strategije selekcioniranja su obrađene u [33].

## 12.4 Generalna projektna procedura i interakcija s projektantom i projektnom okolinom

Opća projektna ljuska DeMak je prikazana na narednoj slici. Razlikuju se dvije faze procesa donošenja odluke:

a) faza generiranja projekata
b) faza selekcije projekata

Prethodno su opisane različite tehnike razvoja i generiranja projekata koje se mogu upotrijebiti u proceduri.




Slika 30 DeMak okolina za postupak potpore donošenju odluke [15]

Osnovni analitički modeli osnivanja i eksploatacije trgovačkog broda su insertirani u fazu generiranja projekta opće projektne ljuske s minimalnom količinom prenošenih podataka (samo vrijednosti aktualnih projektnih varijabli kao ulazni podaci i postignute vrijednosti kriterija kao izlazni podaci).

Osnovni koraci druge faze (racionalne selekcije projekata) koji koriste DeMak višeatributni postupak su sljedeći:

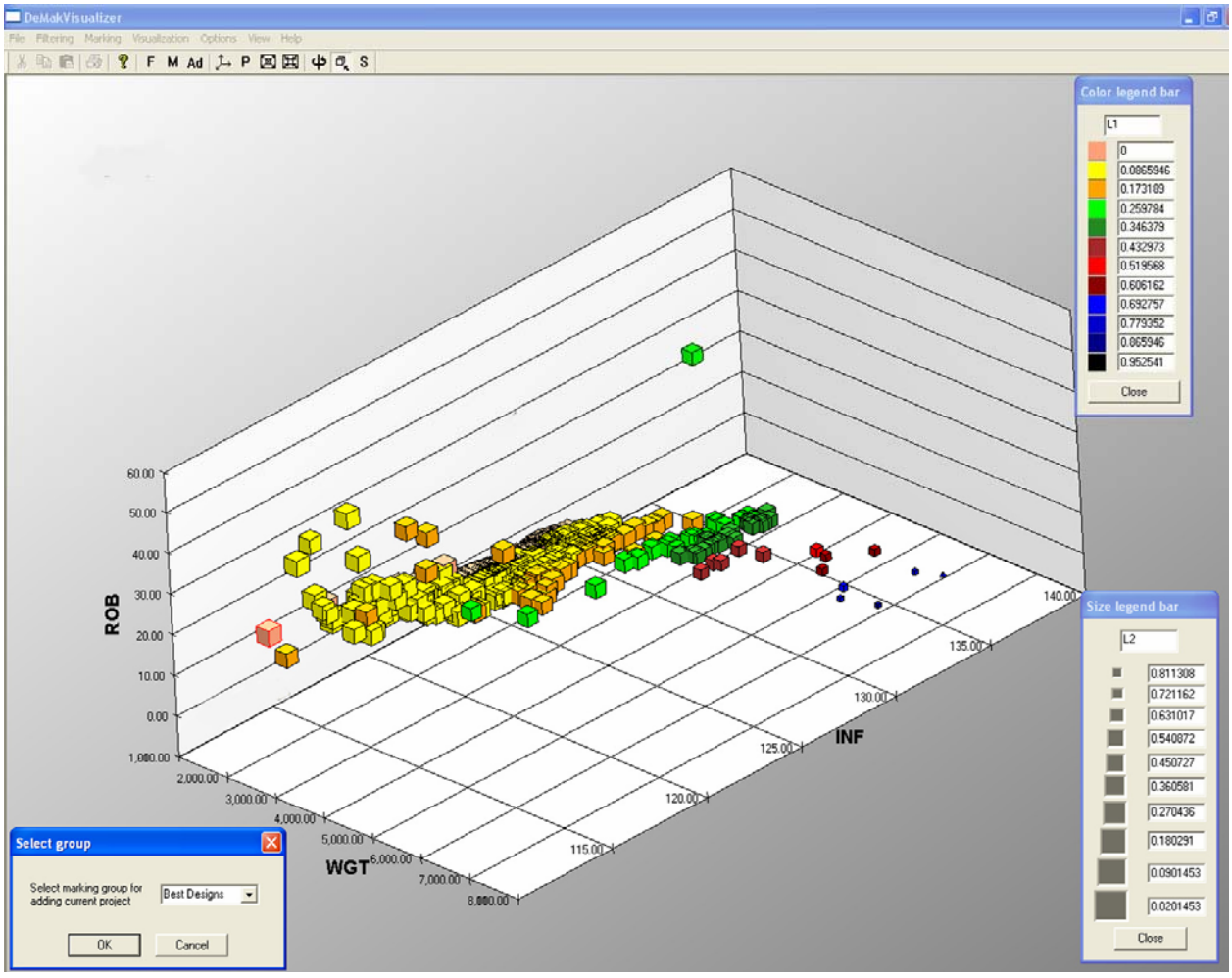
a) Zadavanje kriterija i atributa, tj. profita, cijene, težine, robustnosti, pouzdanosti, sigurnosti, itd.
b) Zadavanje interaktivnih preferencija kojima su definirani međusobni odnosi atributa.
c) Selekcija tipa atributa (osnovni, preko neizrazitih funkcija). Normalizacija vrijednosti atributa (vektor, skalar, neizrazita funkcija).

d) Izračun težinskih faktora iz matrice subjektivnih preferencija (Saaty-eva metoda, metoda najmanjih kvadrata, entropijska metoda). Osnovni zadatak je postizanje konzistentnosti definiranih preferencija.
e) Otklanjanje implicitnog vrednovanja upotrebom post-optimalne analize postignutih vrijednosti atributa za generirane nedominirane projekte.
f) Izračun $L_1$, $L_2$ i $L_\infty$ normi u odnosu na ideal (utopiju) ili zadani cilj za sve nedominirane projekte, pomoću pripadnih težinskih faktora pojedinih atributa. Po potrebi konstrukcija funkcija ostalih vrijednosti.
g) Raspoređivanje skupa nedominiranih rješenja u slojeve obzirom na njihovu kvalitetu – funkcije vrijednosti i interaktivne vizualizacije projektnog prostora i prostora atributa.
h) Biranje preferiranih rješenja u skladu s prethodno definiranom strukturom preferencija.

Različite udaljenosti projekata od ideala (Slika 25c) određene u skladu s odabranom $L_p$ metrikom se mogu koristiti u vizualizaciji višedimenzijskog prostora projektnih atributa i/ili projektnih varijabli. Time se generiraju nove ekspertne spoznaje, pomaže se projektantu u identifikaciji najkvalitetnijih kombinacija projektnih varijabli, ostvarivih alternativa i skupina nedominiranih projekata a time je ostvaren krajnji cilj: realna potpora projektantu prilikom donošenja konačne odluke.

Dosadašnje reference dokazuju da je izložena metoda optimiranja projekta broda (uključujući i interaktivnost/vizualizaciju) provjeren alat koji omogućava ostvarenje značajnih ušteda brodogradilištu i pomorskoj kompaniji po pitanju mogućeg povećanja profitabilnosti, povećanja ukupne nosivosti, smanjenja cijene novogradnje i težine brodske konstrukcije, povećanja sigurnosti i robustnosti, što je posebno interesantno u konceptualnoj fazi projektiranja broda. Stoga se može zaključiti da je uvođenje matematičkog modela asistencije kod donošenja odluka u optimizacijski proces projektiranja broda od izuzetnog interesa za sve koji su uključeni u postupak odlučivanja: projektanta i upravne strukture brodogradilišta i pomorske kompanije.

Interaktivnost i vizualizacija (Slika 31) daju projektantu u ruke izvrstan alat za razumijevanje i provođenje postupka donošenja odluke. Na slici je prikazan 5D interaktivni vizualizacijski alat DeView koji se koristi u DeMak optimizatoru i to na primjeru projekta podkonstrukcije.




Slika 31 Peterodimenzijska vizualizacija prostora atributa (WGT = masa konstrukcije, ROB = mjera robustnosti konstrukcije, INF informatički sadržaj projekta, boja/veličina = udaljenost od ideala u $L_1/L_2$ normama) [15]

## 12.5 Zadavanje preferencija kod primjene metode višeatributne sinteze projekta u optimiranju projekta broda

Nova projektna procedura je opisana u Poglavlju 11, a pripadni matematički modeli u Poglavljima 8 i 10. U daljnjem tekstu će biti opisane specifičnosti kod zadavanja preferencija među pojedinim atributima i unutar pojedinih atributa projekta trgovačkog broda.

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

- postignuta ukupna nosivost $DW_{ach}$,
- postignuti volumen teretnog prostora $V_{car\ ach}$,
- postignuta brzina na pokusnoj plovidbi $v_{tr\ ach}$,
- masa čelične konstrukcije $W_{st}$,
- cijena materijala $C_{mat}$,
- cijena rada (procesa) $C_{lab}$,
- cijena izgradnje broda $C_{nb}$,
- profit broda $P$.

### 12.5.1 Zadavanje preferencija unutar pojedinih atributa projekta broda (prema [14])

Pridruživanjem neizrazite funkcije svakom pojedinom atributu osiguravamo mogućnost "mekog" ispunjavanja ciljanih vrijednosti, odnosno ispunjavanje s zadanom tolerancijom. Također prelazimo iz prostora atributa ***Y*** (Slika 25b) u subjektivni normalizirani prostor ***M*** (Slika 25c), što nadalje omogućuje ponderiranje subjektivnih relativnih preferencija među atributima.

Prilikom pridruživanja neizrazite funkcije svakom pojedinom projektnom atributu treba voditi računa o osnovnim svojstvima osnovnih tipova neizrazite funkcije. Na raspolaganju su četiri funkcije: „Ω“ funkcija koja je zvonastog oblika, „U“ funkcija koja je inverznog zvonastog oblika, „S“ funkcija koja je uzlaznog oblika i „Z“ funkcija koja je silaznog oblika.

„Ω“ funkcija je funkcija privlačenja jer se njome preferira vrijednost atributa u zadanom užem području, penaliziraju se vrijednosti atributa koje su u nešto širem zadanom području, a potpuno odbacuju ona projektna rješenja kojima je vrijednost pojedinog atributa izvan tog šireg područja.

„U“ funkcija je funkcija koja djeluje obrnuto od „Ω“ funkcije, odnosno služi kao funkcija odbijanja. Pridružuje se onim atributima kod kojih želimo izbjeći neko područje vrijednosti, odnosno, odbacuju se ona projektna rješenja kojima je vrijednost unutar tog „zabranjenog“ područja.

„S“ i „Z“ funkcije su specijalni slučajevi „Ω“ funkcije. Kod uzlazne „S“ funkcije ne postoji gornja granica preferiranog područja i primjenjuje se u slučajevima kad bilo koliki rast pojedinog atributa ne kompromitira projektno rješenje. Obrnuto, silazna „Z“ funkcija nema donju granicu i primjenjuje se u onim slučajevima kad projektno rješenje nije kompromitirano niskim vrijednostima atributa.

„Ω“ funkciju je preporučljivo pridružiti onim atributima čije je postignuta vrijednost ujedno i ugovorna obaveza: ukupnoj nosivosti $DW$, brzini u uvjetima pokusne plovidbe $v_{tr}$ i volumenu teretnog prostora $V_{car}$.

„Z“ funkciju je preporučljivo pridružiti onim atributima čije minimiziranje ne donosi nikakve negativne posljedice: masi čelične konstrukcije $W_{st}$, cijeni materijala $C_{mat}$, cijeni rada (procesa) $C_{lab}$ i cijeni izgradnje broda $C_{nb}$.

Obrnuto, „S“ funkciju je preporučljivo pridružiti atributima čije maksimiziranje ne donosi nikakve negativne efekte. U slučaju optimiranja broda, „S“ funkcija se može pridružiti atributu profita broda P.

### 12.5.2 Zadavanja preferencija među pojedinim atributima projekta broda

Prilikom zadavanja numeričkih vrijednosti preferencija za parove atributa (generiranja matrice njihovih međusobnih preferencija) treba težiti što većoj konzistentnosti matrice subjektivnih relativnih preferencija, na osnovi čega tada dobivamo konzistentne težinske faktore za svaki atribut.

Kod nove metodologije projektiranja trgovačkih brodova je značajno da se preferencije među pojedinim atributima više ne zadaju samo od strane brodogradilišta, već u suradnji brodogradilišta i brodovlasnika. U tom smislu je za očekivati da će atribut profita broda biti preferiran u odnosu na ostale projektne atribute.

Međusobni odnosi ostalih atributa ovise o tipu i veličini broda, definiciji pripadnih preferencija unutar pojedinih atributa, te o stavu brodogradilišta i brodovlasnika po pitanju značaja svakog pojedinog atributa.

# 13 UTJECAJ VANJSKIH PARAMETARA NA PROJEKT TRGOVAČKOG BRODA (ROBUSTNOST PROJEKTA)

Prilikom rješavanja tehničkih problema, pa tako i prilikom osnivanja broda, često se sa sigurnošću može očekivati postojanje tehničkog rješenja (projekta broda), no to rješenje ne mora biti jedinstveno ni stabilno, što može uzrokovati značajne probleme pri daljnjoj razradi projekta ili garantiranju kvalitete proizvoda. Svojstva projektnog rješenja (atributi) su često jako osjetljiva na variranje pojedinih projektnih parametara, čime se dovodi u pitanje kvaliteta odabranog projekta i njegova definicija kao „optimalnog projekta“. Također se može dogoditi da pojedina projektna rješenja otpadnu, iako bi bila ostvariva uz minimalne promjene pojedinih parametara.

Analiza robustnosti projekta trgovačkog broda je u ovom radu provedena korištenjem programske aplikacije razvijene na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu [51]. Opis primijenjene metodologije je preuzet iz [51].

## 13.1 Osnove analize robustnosti

Robustnost je definirana kao neosjetljivost (ili stabilnost) projektnog atributa $y_n$ $(\boldsymbol{x},\boldsymbol{d})$ na promjene vrijednosti pojedinih parametara iz parametarskog skupa $\boldsymbol{d}$. Parametarski skup $\boldsymbol{d}$ uključuje samo one parametre čiju je vrijednost teško predvidjeti ili kontrolirati. Prilikom ispitivanja robustnosti na promjene parametara $\boldsymbol{d}$ projektne varijable ispitivanog projekta $\boldsymbol{x}$ su fiksirane.

Uvođenje robustnosti u rješavanje projektnih problema omogućava uvođenje dodatnog projektnog atributa $y_{n+1} = ROB(y_n)$ i njegovo uključivanje u višeatributni optimizacijski postupak. Time se ostvaruje pretpostavka za realizaciju projekata niže osjetljivosti na promjene ulaznih parametara i olakšava donositeljima odluke konačan odabir optimalnog projekta.

Problematika robustnosti projekta je razvijena s ciljem da se ostvari neosjetljivo projektno rješenje (robustnost znači da se optimirani proizvod ili proces konzistentno zadržava u blizini ciljanih svojstava i da je relativno neosjetljiv na parametre koje je teško kontrolirati). Ovom su se problematikom prvi počeli baviti Taguchi [35], Montgomery [36] i Suh [52]. Primjena u projektiranju broda i brodske strukture je kod Grubišić i dr. [14], odnosno kod Pirić i dr. [51]. Metoda se zasniva na raznim tehnikama planiranja pokusa kao što su faktorski pokusi (FFE – „Fractional Factorial Experiments“), ortogonalna polja (OA – „Orthogonal Arrays“), te na analizi varijance (ANOVA – „Analysis of Variance“), itd.

Taguchi je razvio mjeru robustnosti projekta SNR („Signal to Noise Ratio“ – omjer signala i šuma) koji je definiran kao omjer srednje (očekivane) vrijednosti μ pojedinog atributa $y_n$ $(\boldsymbol{x}^{fix},\boldsymbol{d})$ i varijacije koja je posljedica nestabilnosti pojedinog projektnog parametra, a zadana je standardnom devijacijom $\sigma$. Drugim riječima, predstavlja omjer predvidivog i nepredvidivog. Ovaj je pristup, koristeći planiranje pokusa, uveden kod:

- Projektiranja proizvoda ili procesa neosjetljivih na uvjete okoliša,
- Projektiranja i razvoja proizvoda robustnih na variranje pojedinih komponenata,
- Minimiziranja variranja oko ciljane vrijednosti.

Taguchi-ev pristup kvalitetnom projektiranju je široko upotrebljiv. On razlikuje tri faze u razvoju proizvoda (procesa):

1. Projektiranje sustava (projektant se služi znanstvenim i inženjerskim principima u svrhu definiranja osnovne konfiguracije),
2. Projektiranje parametara (zadaju se vrijednosti parametara sustava),
3. Projektiranje tolerancija (služi definiranju najpogodnijih tolerancija za pojedine parametre).

Taguchi preporučuje da se metode planiranja pokusa, koje se koriste u statistici, upotrebljavaju kod problema poboljšavanja kvalitete, posebno prilikom projektiranja parametara i tolerancija. Metode planiranja pokusa se mogu primjenjivati za nalaženje najboljeg projekta proizvoda ili procesa, gdje se pod pojmom najboljeg projekta smatra proizvod ili proces koji je robustan, odnosno neosjetljiv na nepredvidljive parametre (šumove) koji utječu na proizvod ili proces tijekom proizvodnje ili eksploatacije.

Ključni element Taguchi-eve filozofije je reduciranje variranja. Generalno gledajući, svojstva svakog proizvoda ili procesa imaju ciljanu ili nominalnu vrijednost. Cilj je reducirati variranje svojstava oko te ciljane vrijednosti. Odstupanja od ciljane vrijednosti koja se mogu pojaviti, Taguchi modelira pomoću funkcije gubitka. Pod gubitkom se smatra trošak koji trpi društvo kad potrošač upotrebljava proizvod čija se kvaliteta razlikuje od nominalnog. Također sugerira analiziranje varijacija pomoću prikladno odabrane SNR karakteristike [36]. Nadalje je kratko opisana procedura proračuna SNR.

1. Izvršiti izbor nivoa parametara, npr. k = 1-3, za sve nekontrolabilne parametre ($\boldsymbol{d}^{k=1}_{(min)}$, $\boldsymbol{d}^{k=2}_{(mean)}$, $\boldsymbol{d}^{k=3}_{(max)}$) mora biti dovoljno širok da uključi realnu mogućnost variranja,
2. Generirati projekte $\boldsymbol{x}^j$, i = 1,...,N (npr. pomoću planiranja pokusa) gdje je $\boldsymbol{x}^j$ skup projektnih varijabli projekta i,
3. Za svaki projekt $\boldsymbol{x}^j$ izvesti m = 1,...,M eksperimenata (pomoću ortogonalnih polja treba odrediti nivo $k = OA_M(m,j)$ za svaki parametar $d_j$, *t.j.* $(d_j)^m = (d_j)^k$, da bi se odredila mjera robustnosti $y_{n+1}(y_n(\boldsymbol{x}^j, \boldsymbol{d}^m))$,
4. Izračunati variranje nivoa atributa $y_n$ za svaki nivo k projektnog parametra $d_j$ u svrhu daljnje procjene utjecaja pojedinog parametra na robustnost atributa,
5. Eliminirati dominirane projekte obzirom na sve projektne atribute, uključujući i robustnost,
6. Selektirati preferirane projekte pomoću funkcije korisnosti („utility function“ – u) ili funkcije vrijednosti („value function“ – v, npr. norme udaljenosti $L_1$, $L_2$, $L_\infty$ od utopije)

Za nove se proizvode također mogu ispitati interakcije između projektnih varijabli i parametara. U slučajevima kad imamo atribute kod kojih preferiramo minimalno odstupanje od ciljanih vrijednosti, Taguchi definira omjer signal/šum kao:

$$SNR = 20\log\left(\frac{\mu}{\sigma}\right) = 10\log\left(\frac{\mu^2}{\sigma^2}\right) = 10\left[\log\left(\mu^2\right) - \log\left(\sigma^2\right)\right] \qquad (13.1)$$

Ovaj izraz je teoretski malo nejasan zbog toga što je omjer funkcija srednje vrijednosti i standardne devijacije, odnosno, dviju suprotstavljenih mjera (jedna definira točno određeni položaj, a druga rasipanje). Međutim, u većini slučajeva koji se javljaju u industriji izraz je upotrebljiv i koristan, pa se teoretska kritika kvalitete izraza može ublažiti izuzetno dobrim rezultatima u praksi.

Suh [52] je definirao robustni projekt kao onaj projekt koji ispunjava funkcionalne zahtjeve i u onim slučajevima kada se projektni parametri i varijable kreću unutar velikih tolerancija koje olakšavaju proizvodnju. On koristi „Informaciju“ i „Informacijski aksiom“ kao mjerilo kvalitete projekta i kriterij odabira najboljeg od svih prihvatljivih projekata. Informacijskim aksiomom se tvrdi da je najbolji projekt onaj koji ima najveću vjerojatnost ostvarenja. U pojedinim slučajevima, informacijski aksiom se može definirati i kao „minimiziranje informacije“ [52].

Ugradnja robustnosti u projektne probleme se može izvršiti sljedećim modelima:

1. Postprocesiranje prethodno generiranih nedominiranih projektnih rješenja obzirom na robustnost,
2. Direktnim uključivanjem atributa robustnosti u postupak generiranja nedominiranih projektnih rješenja,
3. Hibridnim postupkom.

## 13.2 Kratki opis programske aplikacije

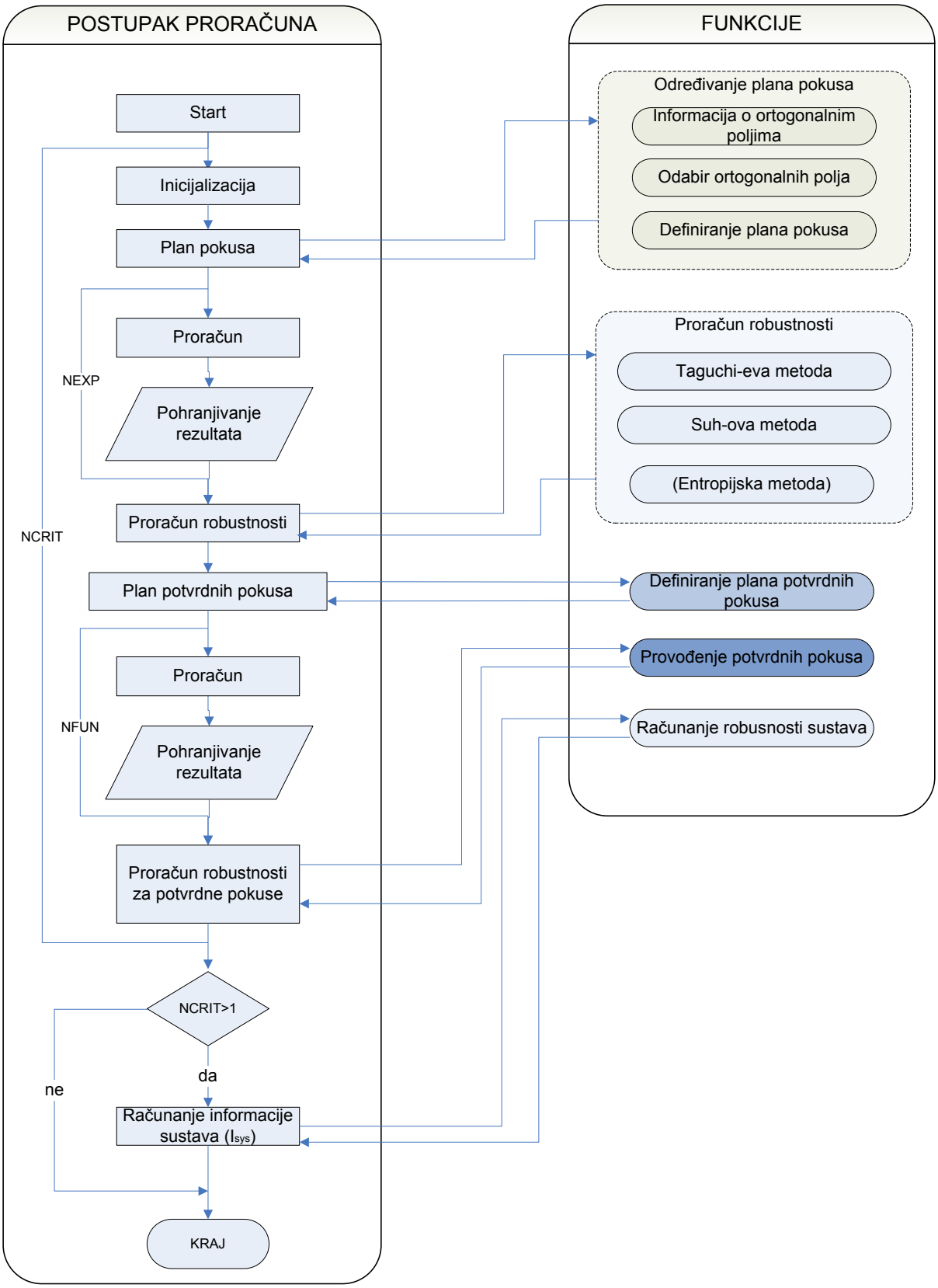
Postupak proračuna i pripadne funkcije su prikazane Slikom 32. Može se uočiti da se procedura sastoji od dva tročlana bloka:

1. Blok inicijalizacije i pripreme – u njemu se vrši planiranje pokusa za generiranje atributa robustnosti. Provodi se samo jednom u pripremnoj fazi proračuna. Definira se broj pokusa (eksperimenata) *NEXP* unutarnjeg i vanjskog ortogonalnog polja („inner and outer orthogonal array“).
2. Proračunski blok – u njemu se provodi proračun osnovnih funkcija $y_n$ ***(x,d)***, n = 1,...,*NFUN* (*NFUN* – broj osnovnih funkcija) u skladu s planom provođenja pokusa (unutarnja i vanjska ortogonalna polja) za zadane vrijednosti ***x*** i ***d*** (prema zadanim nivoima). Kako je prethodno navedeno, ovo se može provesti postprocesiranjem ili direktnim uključivanjem u algoritam kojim se generira Pareto fronta projektnih rješenja.

3. Blok proračuna atributa robustnosti – u njemu su primijenjene dvije metode (Taguchi i Suh).

Također su dodani blokovi za izvedbu:

- Potvrdnog pokusa (za projektna rješenja bazirana na optimalnim nivoima projektnih varijabli)
- Robustnost sustava u slučaju *NCRIT* > 1 (*NCRIT* – broj kriterija) kad projektant može imati mogućnost uvođenja vlastite mjere robustnosti zasnovane na informacijama o pojedinim funkcijama.




Slika 32 Postupak proračuna i pripadne funkcije [51]

## 13.3 Planiranje pokusa

### 13.3.1 Osnove planiranja pokusa

Projektanti i znanstvenici često se susreću s dvije tipične situacije prilikom razvoja projekta, odnosno procesa. U prvoj situaciji treba pronaći varijable kojima će se poboljšati karakteristika do prihvatljive ili optimalne razine. U drugoj situaciji treba pronaći jeftinije alternativno projektno rješenje, materijal ili metodu koja će zadržati isti nivo kvalitete.

Prilikom istraživanja i razvoja poboljšanog ili jednakovrijednog projektnog rješenja često je potrebno provesti pokuse, proučiti postignute karakteristike novog proizvoda i donijeti odluku o usvajanju ili odbacivanju novog projektnog rješenja. Provedba pokusa s potpunim variranjem svih faktora je moguća samo u slučajevima kad se istražuje utjecaj samo nekoliko faktora, no nije prihvatljiva u slučajevima kad postoje brojni utjecajni faktori. U slučaju kad se provodi pokus s potpunim variranjem svih faktora treba testirati minimalno $2^f$ mogućih kombinacija ($f$ – broj faktora na dva nivoa).

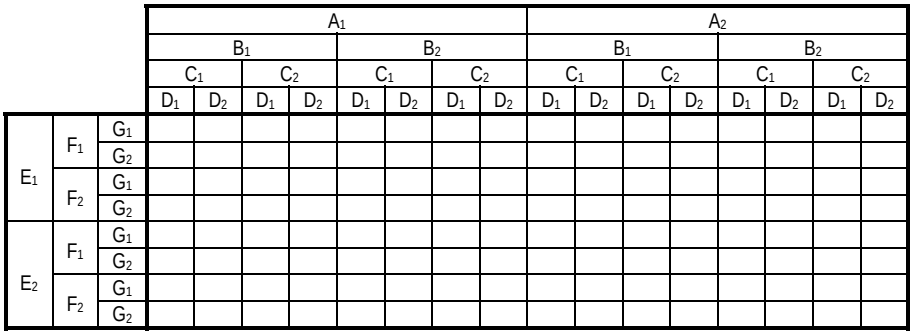
Povećanje broja parametara vodi vrlo brzom rastu mogućih pokusa. Tako npr. u slučaju 6 parametara na 2 nivoa mogući broj pokusa je $n = 2^6 = 64$. U takvom projektu samo 6 od 63 stupnja slobode predstavljaju glavni efekt pojedinog parametra, 15 stupnjeva slobode predstavljaju interakciju između 2 parametra, dok preostala 43 stupnja slobode predstavljaju interakciju između više parametara.

Glavni efekt određenog faktora (parametra) je srednja vrijednost efekta tog faktora na promatranom nivou uzeta u kombinaciji s drugim faktorima na različitim nivoima. U slučaju da interakciju višeg reda (između više faktora) možemo zanemariti, što je najčešći slučaj, tada je efikasnije planirati pokus tako da sadrži samo dio od ukupnog broja pokusa. Za problem s npr. 5 parametara na 3 nivoa problem prevelikog broja pokusa postaje još očitiji (ukupan broj pokusa bio bi $n = 3^5 = 243$*).*

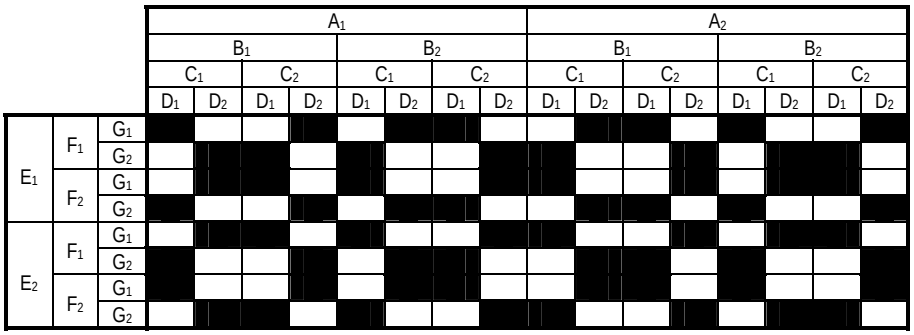
Iz ovih primjera je jasno da je često nemoguće provesti pokus s potpunim variranjem svih faktora zbog vremenskih i financijskih ograničenja prilikom istraživanja. Stoga se postavlja pitanje kako je moguće učinkovito (ekonomski isplativo) istražiti utjecaj pojedinih faktora, odnosno, na koji se način efikasno može istražiti utjecaj određenih projektnih parametara na kvalitetu projekta redukcijom broja svih mogućih pokusa?

Statističari su razvili učinkovite planove ispitivanja koji se nazivaju djelomično faktorski pokusi (FFEs – „Fractional Factorial Experiments“). Ti pokusi koriste samo dio od svih mogućih kombinacija da bi procijenili efekt glavnih faktora i neke, ne sve, interakcije.

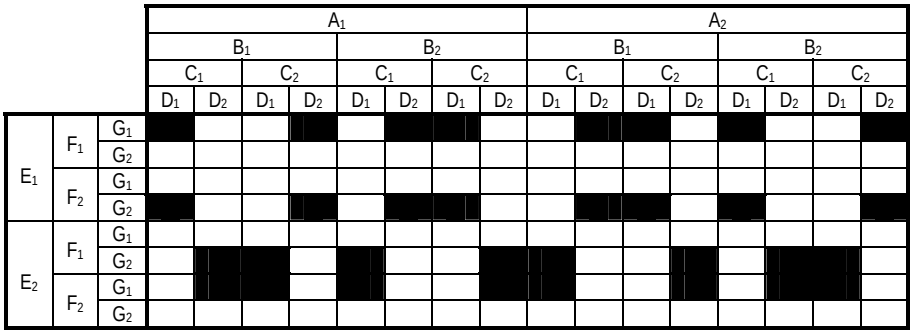
Postoje razni tipovi frakcioniranih pokusa ovisno o broju nivo faktora npr: $2^f$ projekt ($f$ faktora na dva nivoa); $3^f$ projekt ($f$ faktora na tri nivoa) ili pak pokusi koji kombiniraju razne faktore na raznim nivoima [36]. Takvi pokusi koriste samo dio mogućih kombinacija za predviđanje utjecaja pojedinih parametara te određenih interakcija između njih. Jednostavan primjer redukcije broja pokusa za problem sa 7 parametara na 2 nivoa prikazan je na narednoj slici.



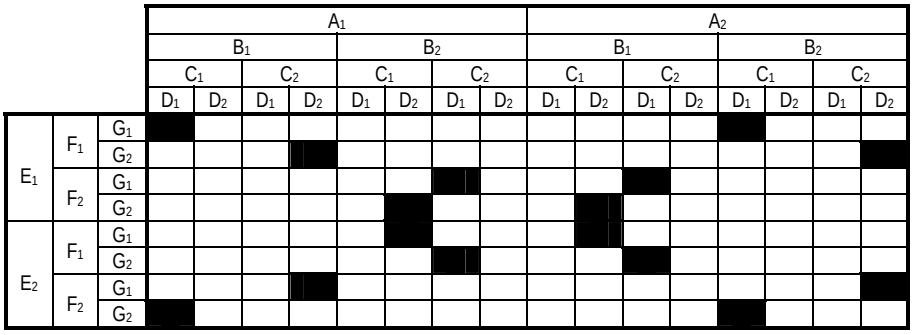

Potpuno variranje svih faktora




1/2 od svih mogućih pokusa




1/4 od svih mogućih pokusa




1/8 od svih mogućih pokusa

Slika 33 Smanjenje broja pokusa na primjeru sa 7 faktora na 2 nivoa [53]

Kombinacije parametara moguće je tako definirati da se omogući ortogonalnost pokusa. Ortogonalnost se očituje u činjenici da se efekt pojedinog parametra može promatrati neovisno tj. efekt jednog parametra ne utječe na procjenu efekta drugih parametara. Jedna od karakteristika ortogonalnosti je balansiranost pokusa, svi parametri su stavljeni u jednaku poziciju tako da nema favoriziranja pojedinog od njih. Ako je pokus postavljen u matričnoj formi tada se polja kojima je definiran pokus nazivaju ortogonalna polja (OA).

Moguće je zadati kombinaciju faktora na način da je međusobna ortogonalnost zajamčena. Pojam ortogonalnosti podrazumijeva da se faktori mogu vrednovati potpuno neovisno jedan od drugoga, odnosno da promjena nivoa jednog faktora ne utječe na procjenu utjecaja drugog faktora. Postizanje ortogonalnosti rezultira uravnoteženim pokusom – jednakim brojem ispitivanja svakog faktora i za svaki nivo pojedinog faktora. Karakteristika ortogonalnih polja je da se svaki nivo svakog parametra pojavljuje jednak broj puta i po redcima i po stupcima, tako da se jednaka važnost daje svim parametrima.

Ranija istraživanja utjecaja parametara na kvalitetu projekta često su se svodila na variranje različitih vrijednosti parametra koji ispitujemo, dok su se ostali parametri držali fiksni. Takva metoda se naziva i kombinacijska tehnika („Combination Design“). Nedostatak takve metode leži u tome da ne postoji garancija da će se efekt nekog faktora biti isti ako promijenimo nivo drugih faktora koji su do tada bili fiksni. Kvaliteta ortogonalnih polja je u tome da se efekt određenog parametra npr. *A* ispituje za razne nivoe drugih parametra *B, C, D*. Ako je efekt faktora *A* jako izražen i za različite nivoe drugih faktora možemo biti sigurni da je taj efekt prilično pouzdan.

Tehnike analize varijance (ANOVA) omogućavaju istraživanja temeljena na statističkim osnovama. Bitno je istaknuti da je u proces istraživanja potrebno uključiti, pogotovo u početku, sve one parametre koji su identificirani kao potencijalno zanimljivi, odnosno utjecajni na razmatrani problem, što traži dobro fizikalno poznavanje problema. Ipak, budući da je veličina broja pokusa relativno neosjetljiva na broj parametara ortogonalnog polja bolje je uključiti u proces istraživanja i one parametre koji se poslije pokažu nebitnima, nego izostaviti neke koji se mogu pokazati značajnima.

Primjerom prikazanim u narednoj tablici može se uočiti da svaki stupac osigurava provođenje četiri pokusa s faktorom na prvom nivou i četiri pokusa s faktorom na drugom nivou. Taguchi je razvio cijeli niz FFE matrica koje se nazivaju ortogonalna polja (OA – „Orthogonal Arrays“), a koja se mogu koristiti u različitim situacijama. Sljedećom tablicom je prikazano orotogonalno polje s osam pokusa (L8).

| | Stupac broj | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Pokus br. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 4 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| 5 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 6 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| 7 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 |
| 8 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 |

Tablica 13 Ortogonalno polje L8 [53]

Gornjom matricom je, u stvari, prikazana jedna šesnaestina FFE matrice u kojoj ima samo 8 od mogućih 128 kombinacija. Osam pokusa osiguravaju ukupno sedam stupnjeva slobode za cijeli pokus, a prikazani su u sedam stupaca na dva nivoa, s tim da svaki stupac ima jedan stupanj slobode.

Ortogonalna polja dopuštaju da se svi stupnjevi slobode pogreške zamijene stupnjem slobode faktora i na taj način omogućavaju određene kombinacije pokusa prihvaćene ovim pristupom. Slučajevi kod kojih je svim stupcima pridružen faktor se nazivaju zasićenim pokusom.

Glavnim efektom faktora se može smatrati razlika između prosječnih odziva na različitim nivoima. Interakcija između faktora postoji kad razlika odziva između nivoa jednog faktora nije jednaka na svim nivoima drugih faktora.

Prednost upotrebe ortogonalnih polja jest u mogućnosti procjene utjecaja nekoliko faktora s minimalnim brojem pokusa.

### 13.3.2 Izbor prikladnih ortogonalnih polja

Stupnjevi slobode. Izbor prikladnog ortogonalnog polja ovisi o:

1. Broju utjecajnih faktora
2. Broju nivoa utjecajnih faktora

Ove dvije stavke određuju ukupan broj stupnjeva slobode koji je potreban za provedbu cijelog pokusa. Stupanj slobode svakog faktora je jednak broju nivoa umanjenom za 1.

$$\nu_A = k_A - 1 \tag{13.2}$$

gdje su:

$v_A$ – stupanj slobode faktora A
$k_A$ – broj nivoa (razina) faktora A

Minimalno zahtijevani stupanj slobode u pokusu je jednak zbroju stupnjeva slobode svih pojedinačnih faktora.

Ortogonalna polja. Ortogonalna polja mogu biti sljedeća:

1. Polja s faktorima na dva nivoa (L4, L8, L16, L32)
2. Polja s faktorima na tri nivoa (L9, L18, L27)
3. Polja s faktorima na četiri nivoa (L16)
4. Polja s faktorima na pet nivoa (L25)

Broj u oznaci polja označava broj pokusa, npr. ortogonalno polje L27 sadrži 27 pokusa. Ukupni stupanj slobode ortogonalnog polja je jednak broju pokusa umanjenom za 1.

$$v_{LN} = N - 1 \tag{13.3}$$

gdje su:

$v_{LN}$ – ukupni stupanj slobode ortogonalnog polja
$N$ – broj pokusa

Odabir ortogonalnog polja. Sljedeća nejednakost treba biti zadovoljena nakon što se izvrši odabir konkretnog ortogonalnog polja za provedbu pokusa:

$$v_{LN} \geq v \tag{13.4}$$

gdje je:

$v$ – stupanj slobode zahtijevan za pojedine faktore

Čest je slučaj da zahtijevani stupanj slobode padne između stupnjeva slobode dvaju ortogonalnih polja. U tom slučaju treba izabrati ortogonalno polje s prvim većim stupnjem slobode. Nakon što se odabere zadovoljavajuće ortogonalno polje, faktori se mogu pridružiti različitim stupcima. Ortogonalna polja imaju na raspolaganju nekoliko stupaca za pridruživanje faktora, dok ostali stupci mogu procijeniti efekt interakcije između faktora. Taguchi je razvio dvije metode koje pomažu prilikom pridruživanja faktora i interakcija poljima:

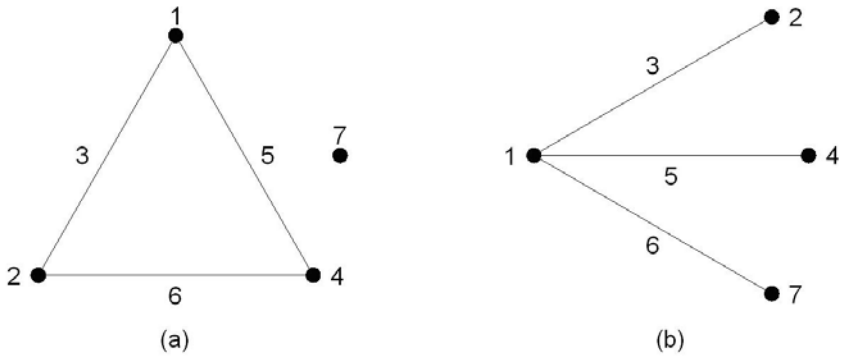
1. Linearni grafovi
2. Trokutne tablice

Za svako ortogonalno polje je razvijena posebna grupa linearnih grafova i trokutnih tablica. Nadalje će biti obrazložena metoda linearnih grafova.

Linearni grafovi. Primjerice, L8 ortogonalno polje ima dva linearna grafa prikazana na sljedećoj slici. Ova dva grafa pokazuju da nekoliko faktora može biti pridruženo različitim stupcima i da se nekoliko različitih interakcija može procijeniti u različitim stupcima. Točke predstavljaju stupac koji je raspoloživ za faktor (glavni efekt) a linije predstavljaju stupac koji procjenjuje interakciju između faktora koji su pridruženi odgovarajućim točkama.

Na primjer, na prikazanom linearnom grafu tip (b) faktori *A*, *B*, *C* i *D* se mogu pridružiti stupcima 1, 2, 4 i 7. U tom slučaju interakcija *AxB* se nalazi u stupcu 3, interakcija *AxC* u stupcu 5, a interakcija *AxD* u stupcu 6.

Drugi linearni graf prikazuje prikazuje alternativni raspored s pridruženim drukčijim interakcijama.




Slika 34 L8 linearni grafovi [53]

Kad su faktori pridruženi pojedinim stupcima odabranog ortogonalnog polja, pojedini pokusi su definirani redovima. Primjer iz naredne tablice: pokus br. 6 se mora provesti s uvjetima $A_2B_1C_2D_1$, a pokus 3 s uvjetima $A_1B_2C_1D_2$.

Uvjeti interakcija se ne mogu kontrolirati tijekom izvođenja pokusa zato što oni ovise o nivoima glavnih efekata. Stupci koji predstavljaju interakcije se razmatraju samo tijekom analize. Zbog toga je preporučljivo da se u planu pokusa prikažu samo nivoi glavnih efekata koji su zadani za pojedini pokus. Time se smanjuje mogućnost pogrešaka u provođenju pokusa koje mogu nenamjerno uništiti ortogonalnost.

| | Faktori i interakcije | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | A | B | AxB | C | AxC | AxD | D |
| | Stupac br. | | | | | | |
| Eksp.br. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 4 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| 5 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 6 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| 7 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 |
| 8 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 |

Tablica 14 Pridruživanje faktora i interakcija (linearni graf tip (b)) kod ortogonalnog polja L8 [53]

### 13.3.3 Pregled svojstava ortogonalnih polja

Osnovna svojstva ortogonalnih polja su prikazana u sljedećoj tablici.

| NAME | NEXP | NCOL | NCOL-LEV | | | | MAX-NLEV |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | (2) | (3) | (4) | (5) | |
| L4 | 4 | 3 | 3 | | | | 2 |
| L8 | 8 | 7 | 7 | | | | 2 |
| L9 | 9 | 4 | | 4 | | | 3 |
| L12 | 12 | 11 | 11 | | | | 2 |
| L16 | 16 | 15 | 15 | | | | 2 |
| L16 | 16 | 5 | | | 5 | | 4 |
| L18 | 18 | 8 | 1 | 7 | | | 3 |
| L18 | 18 | 8 | 2 | 6 | | | 3 |
| L25 | 25 | 6 | | | | 6 | 5 |
| L27 | 27 | 13 | | 13 | | | 3 |
| L27 | 27 | 22 | | 22 | | | 3 |
| L32 | 32 | 31 | 31 | | | | 2 |

Tablica 15 Osnovna svojstva ortogonalnih polja [51]

U prethodnoj su tablici korištene sljedeće oznake:

NAME – Naziv ortogonalnog polja
NEXP– Broj pokusa u ortogonalnom polju
NCOL – Broj stupaca u ortogonalnom polju (maksimalni broj faktora)
NCOL-LEV – Broj stupaca u ortogonalnom polju na pojedinom nivou (nivo 2, 3, 4 i 5)
MAX-NLEV – Maksimalni broj nivoa u ortogonalnom polju

## 13.4 Proračun robustnosti

### 13.4.1 Taguchi-eva mjera robustnosti

U Taguchi-evoj teoriji je ključan pojam gubitka kvalitete. Pojam se zasniva na pretpostavci da u slučaju kad funkcionalna karakteristika *y* odstupa od specificirane ciljane vrijednosti *T*, potrošač i cjelokupno društvo trpi komercijalnu štetu zbog lošije kvalitete proizvoda. Komercijalna šteta je izražena pomoću funkcije gubitka *L(y)*. Na toj osnovi Taguchi definira gubitak kvalitete zbog odstupanja od ciljane vrijednosti pomoću kvadratne funkcije gubitka.

$$L(y) = k(y - T)^2 \tag{13.5}$$

gdje su:

*y* – svojstvo kvalitete proizvoda ili procesa
*k* – konstanta nazvana koeficijentom gubitka kvalitete
*T* – ciljana vrijednost *y*

Omjer signala i šuma *SNR* (Signal-to-noise ratio) kojeg je razvio Taguchi je mjera performance za odabir kontrolnih nivoa koji najbolje prevladavaju šum. *SNR* uzima u obzir i srednju vrijednost i varijabilnost. U najjednostavnijem obliku, *SNR* je omjer srednje vrijednosti (signala) i standardne devijacije (šuma).

Oblik *SNR-a* ovisi o kriteriju kojim se vrednuje karakteristika koja se optimira. Iako postoji velik broj različitih *SNR-ova*, tri se smatraju standardnima i upotrebljavaju se u sljedećim situacijama:

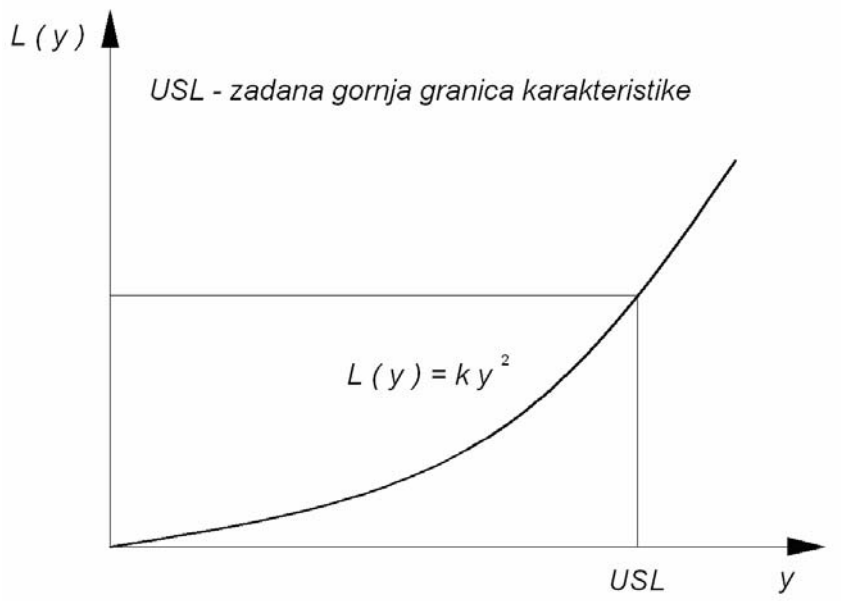
1. Najmanje je najbolja karakteristika kvalitete (onečišćenje, težina, potrošnja energije, vrijeme obrtaja kapitala, itd.)
2. Nominalno je najbolja karakteristika kvalitete (dimenzija, kontrola sustava kormilarenja, kontrola rada motora, itd.)
3. Najveće je najbolja karakteristika kvalitete (čvrstoća, brzina, profit, itd.)

Bilo koja vrsta karakteristike kvalitete ili cijene se transformira tako da se *SNR* uvijek interpretira na isti način: što veći *SNR* to bolje.

1. Najmanje je najbolja karakteristika kvalitete

$$SNR = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2\right) \tag{13.6}$$

Ova karakteristika kvalitete je grafički prikazana sljedećom slikom, gdje *USL* („Upper Specification Limit“) označava narinutu gornju granicu karakteristike kvalitete.




Slika 35 Najmanje je najbolje [51]

2. Nominalno je najbolja karakteristika kvalitete

$$SNR = -10\log\left(\frac{\mu^2}{\sigma^2}\right) \tag{13.7}$$

gdje su:

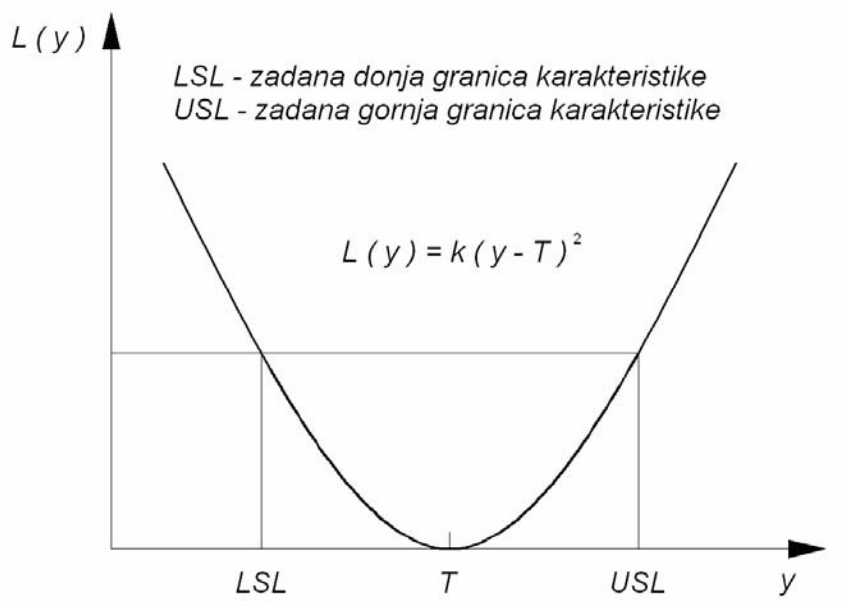
$\mu = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i$ - srednja vrijednost atributa

$\sigma$ - standardna devijacija atributa

$\sigma^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \mu)^2$ - varijanca atributa

$y_i$ – vrijednost atributa u pokusa *i* za određenu kombinaciju nivoa kontrolnih faktora
*n* – broj pokusa koji se provodi za tu određenu kombinaciju

Ova karakteristika kvalitete je grafički prikazana sljedećom slikom, gdje su *USL* („Upper Specification Limit“) označava narinutu gornju granicu karakteristike kvalitete, a *LSL* („Lower Specification Limit“) označava narinutu donju granicu karakteristike kvalitete.

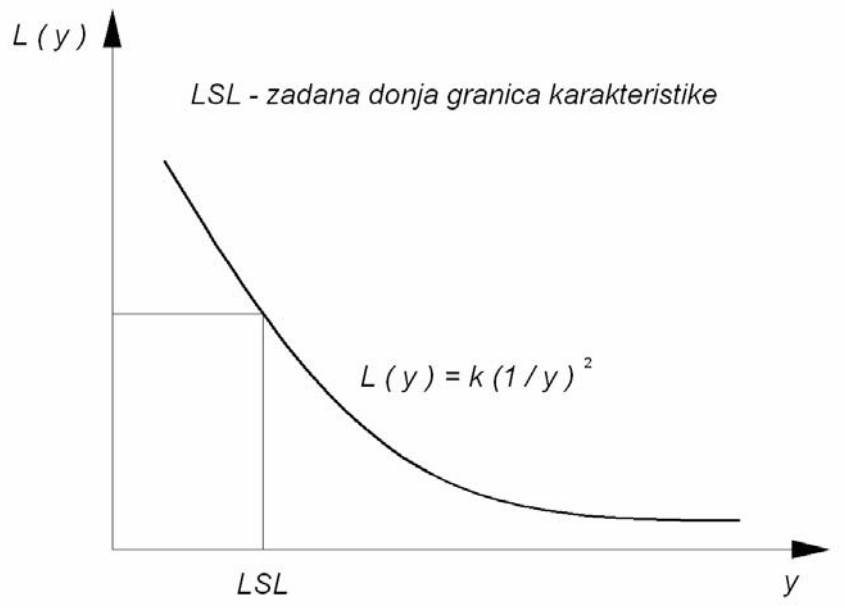



Slika 36 Nominalno je najbolje [51]

3. Najveće je najbolja karakteristika kvalitete

$$SNR = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^2}\right) \tag{13.8}$$

Ova karakteristika kvalitete je grafički prikazana sljedećom slikom, gdje *LSL* („Lower Specification Limit“) označava narinutu donju granicu karakteristike kvalitete.




Slika 37 Najveće je najbolje [51]

### 13.4.2 Provedba pokusa

Standardna procedura provedbe proračuna robustnosti pomoću plana pokusa sadrži nadalje navedene korake.

1. Definirati problem koji treba riješiti. Nužno je potrebno jasno razumijevanje problema da bi se pokus mogao strukturirati.
2. Definirati cilj pokusa. Također treba odrediti karakteristike i nivoe određenog svojstva koji se očekuju po završetku pokusa.
3. Identificirati faktore za koje se očekuje da utječu na karakteristike određenog svojstva.
4. Podijeliti faktore na kontrolne faktore i faktore šuma.
5. Odrediti broj nivoa i vrijednosti za sve faktore. Nivoe faktora treba zadati dovoljno široko da uključe realno moguće raspone i da se izbjegnu „lokalni platoi“ atributnih funkcija. Ujedno, nivoe faktora treba zadati dovoljno usko da se izbjegnu nerealna projektna rješenja. Ukupni broj stupnjeva slobode je direktna funkcija broja nivoa zadanih faktora.
6. Odrediti kontrolne faktore koji mogu imati interakcije. Ove interakcije također troše stupnjeve slobode i utječu na dimenzioniranje pokusa. Jedan od načina dimenzioniranja pokusa je da se veličina pokusa odabere samo prema broju faktora, a zatim preostale slobodne stupce dodijeliti najinteresantnijim interakcijama.
7. Odabrati odgovarajući linearni graf s obzirom na glavne faktore i interakcije. Željeni faktori i interakcije mogu utjecati na odabir ortogonalnog polja.

8. Odabrati ortogonalna polja. Ortogonalna polja, unutrašnje („inner“) i vanjsko („outer“), ovise o ukupnom broju stupnjeva slobode koji je zahtijevan od identificiranih faktora i linearnog grafa.
9. Pridružiti pojedinim stupcima faktore i interakcije. Unutrašnja i vanjska polja imaju isti princip pridruživanja. Ipak, vanjska polja ne bi trebala biti toliko složena kao unutrašnja, jer vanjska predstavljaju isključivo šum koji se kontrolira samo u pokusu.
10. Provesti pokus.
11. Analizirati rezultate.
12. Interpretirati rezultate. Odrediti koji su faktori utjecajni, a koji nisu, za karakteristiku određenog svojstva koje se ispituje.
13. Odabrati optimalne nivoe najutjecajnijih kontrolnih faktora i predvidjeti očekivani rezultat. Utjecajni faktori su samo oni koji su neophodni za zadavanje ili kontrolu nivoa. Neutjecajne faktore treba zadati na najnižem cjenovnom nivou.
14. Provesti potvrdni pokus. Potvrdni pokus je završni korak u verifikaciji zaključaka iz prethodnog kruga pokusa. Nakon što se odaberu nivoi kontrolabilnih faktora bliski optimumu, provodi se pokus pod novim uvjetima. Zamisao je dokazati da odabrani nivoi faktora (i kombinacije nivoa u slučaju značajnih interakcija), a koji nisu bili izvedeni u prethodnom krugu pokusa, daju najkvalitetniji rezultat. Ovo je vrlo značajan korak kojeg ne treba izostaviti.
15. Ponoviti prethodni korak u slučaju kad nije postignut cilj pokusa.

## 13.5 Primjena analize robustnosti kod projekta trgovačkog broda

Analiza robustnosti će biti izvršena postprocesiranjem prethodno generiranih nedominiranih projektnih rješenja obzirom na robustnost. Dominantan atribut kod projektiranja trgovačkog broda je realizirani profit $P$. Stoga prvenstvenu pažnju treba posvetiti analizi robustnosti profita na variranje nekontrolabilnih ulaznih parametara. Zbog stabilnosti rezultata analiza će biti provedena na normaliziranom atributu profita.

Ulazni parametri koji utječu na poslovanje broda su odnos € i US$ $ER$, prosječna jedinična cijena čelika $c_{st}$ i jedinična cijena goriva $c_{fuel}$. Analiza će biti provedena na tri nivoa vrijednosti odabranih parametara prema sljedećoj tablici.

| Parametar | Minimalna očekivana vrijednost | Aktualna vrijednost | Maksimalna očekivana vrijednost |
|---|---|---|---|
| $ER$ (-) | $ER_{min}$ | $ER_{act}$ | $ER_{max}$ |
| $c_{st}$ (US$/t) | $c_{st\ min}$ | $c_{st\ act}$ | $c_{st\ max}$ |
| $c_{fuel}$ (US$/t) | $c_{fuel\ min}$ | $c_{fuel\ act}$ | $c_{fuel\ max}$ |

Tablica 16 Variranje projektnih parametara trgovačkog broda

Obzirom na broj ispitivanih parametara (3) i broj nivoa pojedinog parametra (3), odabrana je ortogonalno polje L9 prema narednoj tablici.

| Pokus broj | Stupac broj | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | 1 | 3 | 3 | 3 |
| 4 | 2 | 1 | 2 | 3 |
| 5 | 2 | 2 | 3 | 1 |
| 6 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| 7 | 3 | 1 | 3 | 2 |
| 8 | 3 | 2 | 1 | 3 |
| 9 | 3 | 3 | 2 | 1 |

Tablica 17 Ortogonalno polje L9 [53]

Za karakteristiku kvalitete je odabrana karakteristika „najveće je najbolje“ koja odgovara osnovnom svojstvu analiziranog atributa (profit *P*), a koja je navedena u izrazu (13.8).

$$SNR = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^2}\right)$$

# 14 OSNIVANJE AFRAMAX TANKERA NOVOM METODOLOGIJOM

## 14.1 Pregled suvremenih Aframax tankera

Aframax tankeri su brodovi za prijevoz tekućih tereta veličine od 75000 do 120000 dwt. U pravilu su namijenjeni za prijevoz sirove nafte, rjeđe i naftnih derivata. Izraz „aframax“ potječe od engleskog izraza „Average Freight Assessment“, što bi se moglo prevesti kao „prosječna brodska pristojba“, odnosno predstavlja brod kojem su osnovne izmjere definirane uzimajući u obzir mogućnost prihvata u većem broju luka, a da se pri tome lučke pristojbe kreću unutar prihvatljivih granica. Primjeri suvremenih i vrlo kvalitetnih brodova su dani u sljedećoj tablici.

| Brodogradilište | Samsung | Daewoo | Hyundai | Sasebo | Brodosplit |
|---|---|---|---|---|---|
| $L_{oa}$ (m) | 249.97 | 249.9 | | | 247.24 |
| $L_{pp}$ (m) | 239.0 | 239.0 | 239.0 | 235.3 | 236.0 |
| B (m) | 43.8 | 44.0 | 44.0 | 42.0 | 42.0 |
| D (m) | 21.0 | 21.0 | 21.0 | 21.5 | 21.0 |
| $d_s$ (m) | 14.9 | | 14.9 | | 15.6 |
| DW (t) | 115000 | 115000 | 115000 | 115567 | 114000 |
| GT | 61342 | | | 59158 | 59315 |
| $V_{car}$ ($m^3$) | 127728 | | | | 126210 |
| Porivni stroj | 6S60MC-C | 5S70MC-C | 7S60MC-C | | 6S60MC-C |
| MCR (kW/n) | 13560/105 | 15550/91 | 15820/105 | | 13560/105 |
| CSR (kW/n) | | | | | 12204/101 |
| $v_{trial}$ (čv) | | | | | 15.3 na $d_d$ |
| $v_{service}$ (čv) | | 14.8 | 15.1 | 14.5 | 14.7 na $d_d$ |

Tablica 18 Suvremeni Aframax tankeri

Iz gornjih se podataka mogu sintezirati sljedeća zajednička svojstva:

- Ukupna nosivost se kreće od 114000 do 115600 t,
- Duljina među okomicama se kreće od 235.3 do 239 m,
- Širina se kreće od 42 do 44 m,
- Maksimalni gaz se kreće od 14.9 do 15.6 m,
- Volumen tankova tereta je 126000 do 128000 $m^3$,
- Brzina u službi se kreće od 14.5 do 15.1 čv,
- Specifična voluminoznost broda je u području od 0.58 do 0.61.

## 14.2 Projektni zahtjev

Na osnovi gornjih podataka možemo postaviti sljedeći projektni zahtjev:

| Projektni zahtjev | Tražena vrijednost |
|---|---|
| Ukupna nosivost *DW* (t) | 114000 |
| Volumen tankova tereta $V_{car}$ ($m^3$) | 128000 |
| Brzina na maksimalnom gazu u uvjetima pokusne plovidbe $v_{tr}$ (čv) | 15.1 |

Tablica 19 Projektni zahtjev za Aframax tanker

U okviru projektnog zadatka neće biti zadana ograničenja osnovnih izmjera broda: duljine između okomica, širine i maksimalnog gaza. Eventualna ograničenja izmjera i njihovih međusobnih odnosa će proisteći iz postupka ekstrapolacije projektnih varijabli izvan područja suvremenih projekta, odnosno iz stava sudionika u odlučivanju.

## 14.3 Definiranje projektnog prostora

U skladu s iznesenim u Poglavljima 4 i 11, te prikazima postupka definiranja novog projektnog prostora na Slikama 4, 5, 6, 22 i 23, min-max ograničenja projektnih varijabli koje opisuju projektni prostor se mogu odrediti na nadalje izloženi način.

Definirane su sljedeće projektne varijable $\boldsymbol{x} = \boldsymbol{x}_{dsgn}$:

- duljina među okomicama $L_{pp}$,
- širina $B$,
- maksimalni gaz $d_s$,
- blok koeficijent $C_B$,
- volumen tankova tereta $V_{car}$,
- brzina broda $v_{tr}$,
- identifikator porivnog stroja $I_{me\ i}$

Temeljem dostupnih podataka o suvremenim aframax tankera možemo očekivati da će se vlastita masa broda *LS* kretati između 18800 t do 19800 t. Obzirom da je istisnina na maksimalnom gazu definirana kao:

$$\Delta = DW + LS = 1.0272 L_{pp} B d_s C_B \text{ (t)} \tag{14.1}$$

Minimalne i maksimalne vrijednosti istisnine na maksimalnom gazu iznose:

$$132800 \leq \Delta \leq 133800 \tag{14.2}$$

Odnosno:

$$132800 \leq 1.0272 L_{pp} B d_s C_B \leq 133800 \tag{14.3}$$

Ispitivanje gornjeg uvjeta u sljedećem širokom ekstrapoliranom području:

| varijabla | donja granica | gornja granica |
|---|---|---|
| $L_{pp}$ (m) | 220.0 | 260.0 |
| $B$ (m) | 40.0 | 50.0 |
| $d_s$ (m) | 14.6 | 16.4 |
| $C_B$ (-) | 0.78 | 0.835 |

Tablica 20 Početno ekstrapolirano područje osnovnih izmjera Aframax tankera

i sa zadanim ograničenjima odnosa osnovnih izmjera:

| Odnos izmjera | donja granica | gornja granica |
|---|---|---|
| $L_{pp}/B$ | 5.4 | 6.6 |
| $L_{pp}/d_s$ | 15 | 17 |
| $B/d_s$ | 2.5 | 3.0 |

Tablica 21 Ograničenja odnosa osnovnih izmjera Aframax tankera

Nakon primjene ograničenja prikazanih u (14.3) i u Tablici 21, te nakon zadavanja min-max ograničenja preostalim projektnim varijablama, projektno područje je definirano kako slijedi:

| varijabla | donja granica | gornja granica |
|---|---|---|
| $L_{pp}$ (m) | 234.0 | 260.0 |
| $B$ (m) | 40.0 | 45.0 |
| $d_s$ (m) | 14.6 | 16.2 |
| $C_B$ (-) | 0.78 | 0.835 |
| $V_{car}$ ($m^3$) | 127600 | 128400 |
| $v_{tr}$ (čv) | 14.7 | 15.5 |

Tablica 22 Novo projektno područje osnovnih izmjera Aframax tankera

Kod selekcije porivnog stroja promotrimo strojeve iz sljedeće tablice:

| Porivni stroj | 6S60MC-C7 | 7S60MC-C7 | 5S70MC-C7 |
|---|---|---|---|
| *MCR* (kW) | 13560 | 15820 | 15550 |
| Okretaji/min | 105 | 105 | 91 |
| Masa stroja (t) | 368 | 410 | 495 |
| Duljina stroja (mm) | 8142 | 9162 | 8308 |
| Relativna cijena | 100 | 115 | 120 |

Tablica 23 Porivni strojevi za moguću ugradnju u Aframax tanker

Šesterocilindarski porivni stroj 6S60MC-C ima odgovarajuću snagu i broj okretaja za postizanje zahtijevane brzine broda. Odabran je za porivni stroj kod najvećeg broja suvremenih aframax tankera. Vibracijski je pogodniji od ostala dva potencijalna stroja. Najjeftiniji je i najkraći (posljedično vodi najkraćoj strojarnici i najvećoj iskoristivosti ukupnog volumena broda, odnosno najvećoj specifičnoj voluminoznosti broda κ).

Sedmerocilindarski porivni stroj 7S60MC-C ima veću maksimalnu snagu od potrebne, pa se može deratirati selektiranjem nižeg maksimalnog broja okretaja s odgovarajućom nižom maksimalnom snagom. Snižavanje selektiranog broja okretaja ispod 80 ($min^{-1}$) vodi promjeru optimalnog četverokrilnog propelera od preko 8 metara, što izaziva ozbiljne poteškoće kod smještaja propelera. Kako se maksimalni ugradivi promjer propelera $D_{prop\ max}$ može procijeniti na oko 7.8 m, alternativno rješenje je podoptimalni propeler promjera ograničenog na maksimalni ili podoptimalni propeler s većim brojem krila. Stroj je teži 40-tak tona od šesterocilindarskog te 15-tak posto skuplji.

Peterocilindarski porivni stroj 5S70MC-C također ima veću maksimalnu snagu od potrebne, pa se i on može deratirati selektiranjem nižeg maksimalnog broja okretaja s odgovarajućom nižom maksimalnom snagom. Slučaj je vrlo sličan prethodnom, osim što su okretaji još niži. Mogu se potpuno primijeniti zaključci o izboru propelera iz prethodnog primjera. Stroj je teži oko 130 tona od šesterocilindarskog te 20-tak posto skuplji. Zbog iznesenog ovaj se stroj može odbaciti iz daljnjeg razmatranja.

Konačno, novo projektno područje se može kako slijedi:

| varijabla | donja granica | gornja granica |
|---|---|---|
| $L_{pp}$ (m) | 234.0 | 260.0 |
| $B$ (m) | 40.0 | 45.0 |
| $d_s$ (m) | 14.6 | 16.2 |
| $C_B$ (-) | 0.78 | 0.835 |
| $V_{car}$ ($m^3$) | 127600 | 128400 |
| $v_{tr}$ (čv) | 14.7 | 15.5 |
| $I_{me\ i}$ (-) | 1 (6S60MC-C7) | 2 (7S60MC-C7) |

Tablica 24 Novi projektni prostor Aframax tankera

## 14.4 Identifikacija projektnog zadatka

### 14.4.1 Projektne varijable $\boldsymbol{x} = \boldsymbol{x}_{dsgn}$

Sljedeće projektne varijable $\boldsymbol{x}_{dsgn} = \{L_{pp}, B, d_s, C_B, V_{car}, v_{tr}, I_{me}\}$ su identificirane:

- duljina među okomicama $L_{pp}$,
- širina $B$,
- maksimalni gaz $d_s$,
- blok koeficijent $C_B$,
- volumen teretnog prostora $V_{car}$,
- brzina broda $v_{tr}$,
- identifikator porivnog stroja $I_{me\ i}$.

### 14.4.2 Projektni parametri $\boldsymbol{d} = \{\boldsymbol{d}_{dsgn}, \boldsymbol{d}_{exp}\}$

Projektni parametri se sastoje od dvaju velikih cjelina: parametara koji proistječu iz projekta i gradnje broda $\boldsymbol{d}_{dsgn}$ te parametara koji proistječu iz eksploatacije broda $\boldsymbol{d}_{exp}$. Parametri koji proistječu iz projekta i gradnje broda su prikazani sljedećom tablicom:

| Projektni parametar | Zadana vrijednost |
|---|---|
| Zahtijevana ukupna nosivost $DW_{req}$ (t) | 114000 |
| Zahtijevani vol. teret. prostora $V_{car\ req}$ ($m^3$) | 128000 |
| Zahtijevana brzina $v_{tr\ req}$ (čv) | 15.1 |
| „Specifična voluminoznost broda“ $\kappa$ (-) | 0.608 – 0.586 |
| Utjecaj čelika povišene čvrstoće $f_1$ (%) | 5.0 |
| Maksimalna snaga porivnog stroja 1 $MCR_1$ (kW) | 13560 |
| Cijena porivnog stroja 1 $C_{me\ 1}$ (€) | 4300000 |
| Maksimalna snaga porivnog stroja 2 $MCR_2$ (kW) | 15820 |
| Cijena porivnog stroja 2 $C_{me\ 2}$ (€) | 4800000 |
| Jedinična cijena čelika $c_{st}$ (US$/t) | 700 |
| Odnos bruto/neto mase čelika $c_{gwst}$ (-) | 1.12 |
| Cijena preostalog materijala i opreme $C_{res}$ (€) | 9000000 |
| Proizvodnost $P_{cGT}$ (rs/cGT) | 25.0 |
| Jedinična satnica $v_{lab}$ (€/rs) | 18.0 |
| Preostali fiksni troškovi $C_{pt\ fix}$ (€) | 500000 |
| Udio preostalih varijabilnih troškova $c_{var}$ (%) | 8 |
| Odnos €/US$ $ER$ (-) | 1.35 |

Tablica 25 Projektni parametri $\boldsymbol{d}_{dsgn}$ proizašli iz projekta i gradnje Aframax tankera

Na ovom mjestu treba obratiti pozornost na „specifičnu voluminoznost broda“ κ koja je definirana kao omjer volumena teretnih tankova i umnoška osnovnih izmjera $L_{pp}$, $B$ i $D$,

te predstavlja, na određeni način, pokazatelj kvalitete „iskorištenosti“ brodskog prostora. Ovaj parametar ovisi o veličini i tipu broda, dimenzijama porivnog stroja, odnosno strojarnice, odnosima glavnih izmjera broda, tipu i vitkosti brodske forme. Jasno je da ga se ne može jednostavno izraziti funkcijom svih ovih varijabli, no moguće je odrediti njegovu zavisnost o dominantnoj varijabli. Kako je novom metodologijom prostor projektnih varijabli bitno širi nego što je to uobičajeno, „specifičnu voluminoznost broda“ ne bi bilo korektno zadati fiksnom, već je izražena kao funkcija duljine broda između okomica $L_{pp}$. Naravno, projektima s manjom duljinom (i većim blok koeficijentom) je pridružena veća vrijednost, a projektima s većom duljinom (i manjim blok koeficijentom) je pridružena manja vrijednost „specifične voluminoznosti broda“. U prethodnoj tablici su zadane vrijednosti $\kappa$ za minimalnu i maksimalnu duljinu broda. Vrijednost $\kappa$ za duljine broda između minimalne i maksimalne se izračunava linearnom interpolacijom. Utjecaj izbora porivnog stroja (sedmerocilindarski stroj vodi produljenju strojarnice za oko 800 mm, odnosno jedno građevno rebro) se, u ovoj fazi razrade projekta, može zanemariti, jer se zbog toga izgubi svega oko 350 $m^3$ teretnog prostora, što je manje od 0.3% ukupnog volumena skladišta tereta.

Druga velika grupa su parametri koji proistječu iz eksploatacije broda i prikazani su sljedećom tablicom:

| Projektni parametar | Zadana vrijednost |
|---|---|
| Cijena „standardne“ novogradnje $C_{nb\text{-}stand}$ (US$) | 50000000 |
| Rok eksploatacije broda $T_{exp}$ (god) | 12.0 |
| Stopa deprecijacije broda *DEP* (%) | 5.0 |
| Godišnja stopa inflacije *INF* (%) | 2.0 |
| Spec. potrošnja poriv. stroja *SFOC* (t/kWh) | 0.00017 |
| Jedinična cijena goriva $c_{fuel}$ (US$/t) | 470 |
| Dnevni prihod od eksploatacije $R_{day}$ (US$) | 34500 |
| Vrijeme broda van najma $O_{year}$ (dan/god) | 5 |
| Trošak posade $C_{crew}$ (US$) | 1100000 |
| Trošak zaliha i maziva $C_{stor}$ (US$) | 115000 |
| Trošak tekućeg održavanja $C_{main}$ (US$) | 125000 |
| Trošak osiguranja $C_{ins}$ (US$) | 110000 |
| Opći troškovi $C_{gen}$ (US$) | 120000 |
| Trošak periodičnog održavanja $C_{dock}$ (US$) | 85000 |
| Trošak lučkih pristojbi $C_{port}$ (US$) | 70000 |
| Trošak remorkera i pilota $C_{tug}$ (US$) | 50000 |
| Trošak kanala i plovnih putova $C_{can}$ (US$) | 35000 |
| Trošak ukrcaja tereta $C_{load}$ (US$) | 25000 |
| Trošak iskrcaja tereta $C_{un}$ (US$) | 25000 |
| Trošak oštećenja tereta $C_{claim}$ (US$) | 30000 |
| Vrijeme plovidbe s teretom $T_{car}$ (dan/god) | 140 |
| Vrijeme plovidbe u balastu $T_{ball}$ (dan/god) | 140 |
| Vrijeme na ukrcaju tereta $T_{load}$ (dan/god) | 40 |
| Vrijeme na iskrcaju tereta $T_{un}$ (dan/god) | 40 |
| Potrošnja pom. stroj. - plovidba/teret $FOCC_{aux}$ (t/dan) | 3.0 |
| Potrošnja pom. stroj. - plovidba/balast $FOCB_{aux}$ (t/dan) | 3.0 |
| Potrošnja pom. stroj. - luka/ukrcaj $FOCL_{aux}$ (t/dan) | 4.5 |
| Potrošnja pom. stroj. - luka/iskrcaj $FOCU_{aux}$ (t/dan) | 8.0 |
| Faktor smanjenja potrošnje u balastu $f_{ball}$ (%) | 10.0 |
| Godišnja kamata i/ili dividenda *INT* (%) | 5.0 |
| Jedinična cijena otpadnog čelika (US$/t) | 400 |

Tablica 26 Projektni parametri $\boldsymbol{d}_{exp}$ proizašli iz eksploatacije Aframax tankera

### 14.4.3 Projektna ograničenja $\boldsymbol{g} = \boldsymbol{g}_{dsgn}$

Projektna ograničenja su definirana u Poglavlju 14.3. Nadalje će biti kratko rekapitulirana. Projektna ograničenja izražena minimalnim i maksimalnim vrijednostima projektnih varijabli $\boldsymbol{g}_{min\text{-}max}$ su identična granicama novog projektnog prostora iz Tablice 24, odnosno:

| varijabla | donja granica | gornja granica |
|---|---|---|
| $L_{pp}$ (m) | 234.0 | 260.0 |
| $B$ (m) | 40.0 | 45.0 |
| $d_s$ (m) | 14.6 | 16.2 |
| $C_B$ (-) | 0.78 | 0.835 |
| $V_{car}$ ($m^3$) | 127600 | 128400 |
| $v_{tr}$ (čv) | 14.7 | 15.5 |

Tablica 27 Ograničenja projektnih varijabli $\boldsymbol{g}_{min\text{-}max}$ Aframax tankera

Drugu skupinu ograničenja čine ograničenja međusobnih odnosa pojedinih varijabli $\boldsymbol{g}_{ratios}$ i definiraju se sukladno projektantovim subjektivnim stavovima i iskustvu. Prva tri ograničenja međusobnih odnosa varijabli ($L_{pp}/B$, $L_{pp}/d_s$ i $B/d_s$) su prethodno zadana ograničenjima odnosa osnovnih izmjera iz Tablice 21 prilikom definiranja novog projektnog prostora. Ograničenja slijede preporuke iz [16,17] uz uvažavanje specifičnosti projektnog prostora koji je razapet projektnim varijablama.

| odnos varijabli | donja granica | gornja granica |
|---|---|---|
| $L_{pp}/B$ | 5.4 | 6.6 |
| $L_{pp}/d_s$ | 15 | 17 |
| $B/d_s$ | 2.5 | 3.0 |
| $L_{pp}/D$ | 11.2 | 12.6 |

Tablica 28 Ograničenja odnosa projektnih varijabli $\boldsymbol{g}_{ratios}$ Aframax tankera

### 14.4.4 Projektni atributi $\boldsymbol{y(x,d)} = \{\boldsymbol{y}_{dsgn}, \boldsymbol{y}_{exp}\}$

Projektni atributi su prethodno opisani u Poglavljima 8, 10 i 11. N-torka atributa se sastoji od n-torke atributa proisteklih iz projekta i gradnje broda $\boldsymbol{y}_{dsgn} = \{DW_{ach}, V_{car\ ach}, v_{tr\ ach}, W_{st}, CSR, C_{mat}, C_{lab}, C_{nb}\}$ i atributa $P$ proisteklog iz eksploatacije broda. Nadalje su, zbog preglednosti, samo rekapitulirani:

- Postignuta ukupna nosivost $DW_{ach}$ (t),
- Postignuti volumen teretnog prostora $V_{car\ ach}$ ($m^3$),
- Postignuta brzina $v_{tr\ ach}$ (čv),
- Masa čelične konstrukcije $W_{st}$ (t),
- Snaga porivnog stroja $CSR$ (kW),
- Cijena materijala $C_{mat}$ (US$),
- Cijena rada (procesa) $C_{lab}$ (US$),
- Cijena novogradnje $C_{nb}$ (US$),
- Profit broda $P$ (US$).

U skladu s iznesenim u Poglavlju 12.2.1 i 12.2.2 preferencije unutar svakog pojedinog projektnog atributa se zadaju pomoću neizrazitih funkcija. Atributima pridružujemo neizrazite funkcije kojima zadajemo područje „mekog“ ispunjavanja ciljanih vrijednosti. Jedini izuzetak je atribut snage porivnog stroja koji je preko potrošnje goriva porivnog stroja, troškova putovanja i troškova eksploatacije broda linearno vezan za atribut profita broda, pa stoga atributu snage porivnog stroja ne pridružujemo neizrazitu funkciju, niti ga kasnije tretiramo prilikom određivanja subjektivnih relativnih preferencija među atributima.

Atributima je moguće pridružiti jednu od četiriju raspoloživih neizrazitih funkcija: „Ω“ (zvonasti oblik - privlačenje), „U“ (inverzija - odbijanje), „S“ (uzlazni oblik) i „Z“ (silazni oblik).

Kod atributa koji su predmet ugovornih obaveza ($DW$, $V_{car}$, $v_{tr}$) preporučljivo je odabrati "Ω" oblik neizrazite funkcije - veće odstupanje od vrijednosti zadanih projektnim zahtjevom mogu rezultirati negativnim posljedicama. Značajni podbačaj u njihovom ispunjavanju mogu dovesti do nepreuzimanja broda od strane brodovlasnika, raskidu brodograđevnog ugovora i slijedom toga, velikim štetama za brodogradilište. Veliki prebačaj u njihovom ispunjavanju ne vodi negativnim efektima tog nivoa, 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 atributa koji proizlaze iz projekta i gradnje broda ($W_{st}$, $C_{mat}$, $C_{lab}$ i $C_{nb}$), 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 i brodovlasnika. Isto tako, minimiziranje cijene izgradnje broda i svih njenih elemenata može imati samo pozitivne efekte kako za brodogradilište, tako i za brodovlasnika.

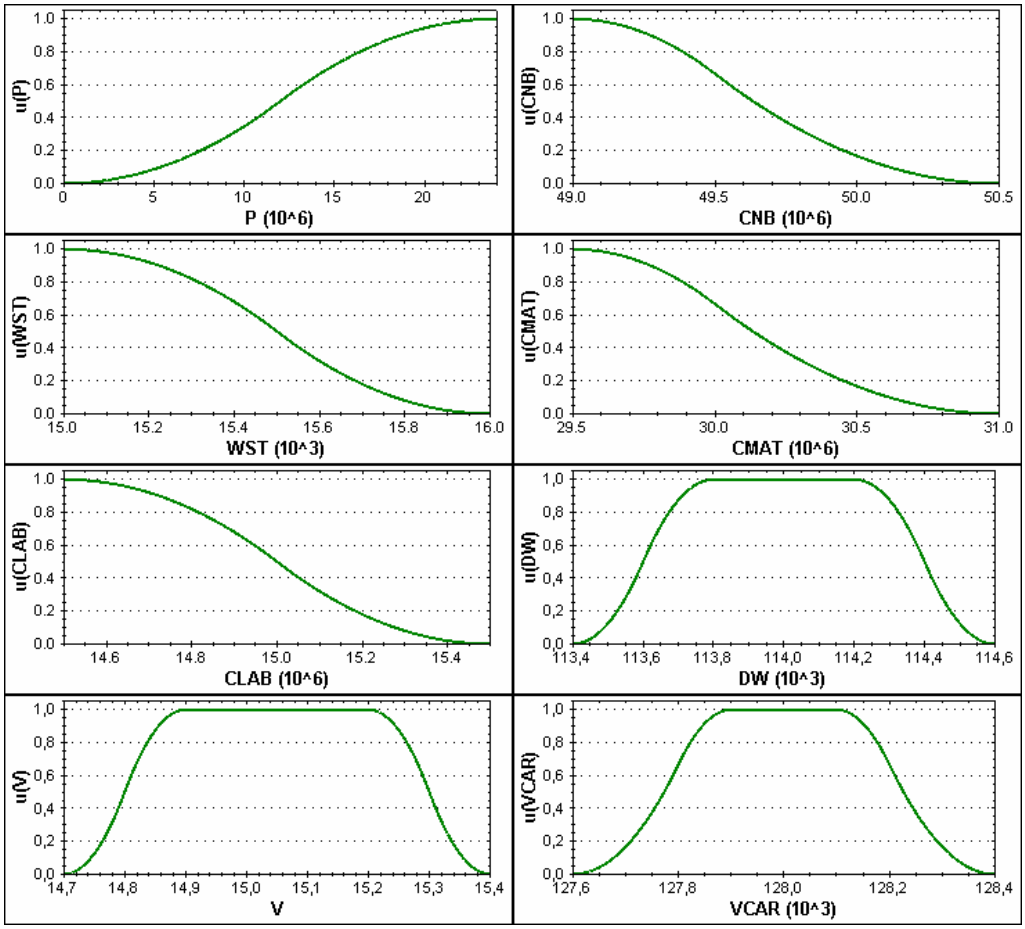
Obrnuta je situacija kod zadavanja neizrazite funkcije za atribut profita broda P. U ovom slučaju nije potrebno zadavati gornju granicu neizrazite funkcije jer rast profita ima isključivo pozitivan efekt na poslovanje broda. Stoga je ovom atributu preporučljivo pridružiti „S“ oblik neizrazite funkcije.

Sljedećom tablicom su prikazane neizrazite funkcije koje su pridružene svakom pojedinom projektnom atributu.

| Atribut | Tip funkcije | $a_1$ | $b_1$ | $c_1$ | $c_2$ | $b_2$ | $a_2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *DW* (t) | Ω | 113400 | 113600 | 113800 | 114200 | 114400 | 114600 |
| $V_{car}$ ($m^3$) | Ω | 127600 | 127800 | 127900 | 128100 | 128200 | 128400 |
| $v_{tr}$ (čv) | Ω | 14.7 | 14.8 | 14.9 | 15.2 | 15.3 | 15.4 |
| $W_{st}$ (t) | Z | | | | 15000 | 15500 | 16000 |
| $C_{mat}$ (mUS$) | Z | | | | 29.5 | 30.0 | 31.0 |
| $C_{lab}$ (mUS$) | Z | | | | 14.5 | 15.0 | 15.5 |
| $C_{nb}$ (mUS$) | Z | | | | 49.0 | 49.5 | 50.5 |
| *P* (mUS$) | S | 0 | 12.0 | 24.0 | | | |

Tablica 29 Neizrazite funkcije pridružene pojedinim atributima Aframax tankera

Naredna slika prikazuje daje grafički prikaz neizrazitih funkcija.




Slika 38 Grafički prikaz neizrazitih funkcija kod osnivanja Aframax tankera

Unutar-atributne preferencije su zadane neizrazitim funkcijama koje su u slučaju ukupne nosivosti *DW*, volumena teretnog prostora $V_{car}$ i brzine broda $v_{tr}$ „Ω“ oblika, u slučaju mase čelične konstrukcije $W_{st}$, cijene materijala $C_{mat}$, cijene rada $C_{lab}$ i cijene novogradnje $C_{nb}$ „Z“ oblika, a u slučaju profita broda *P* „S“ oblika.

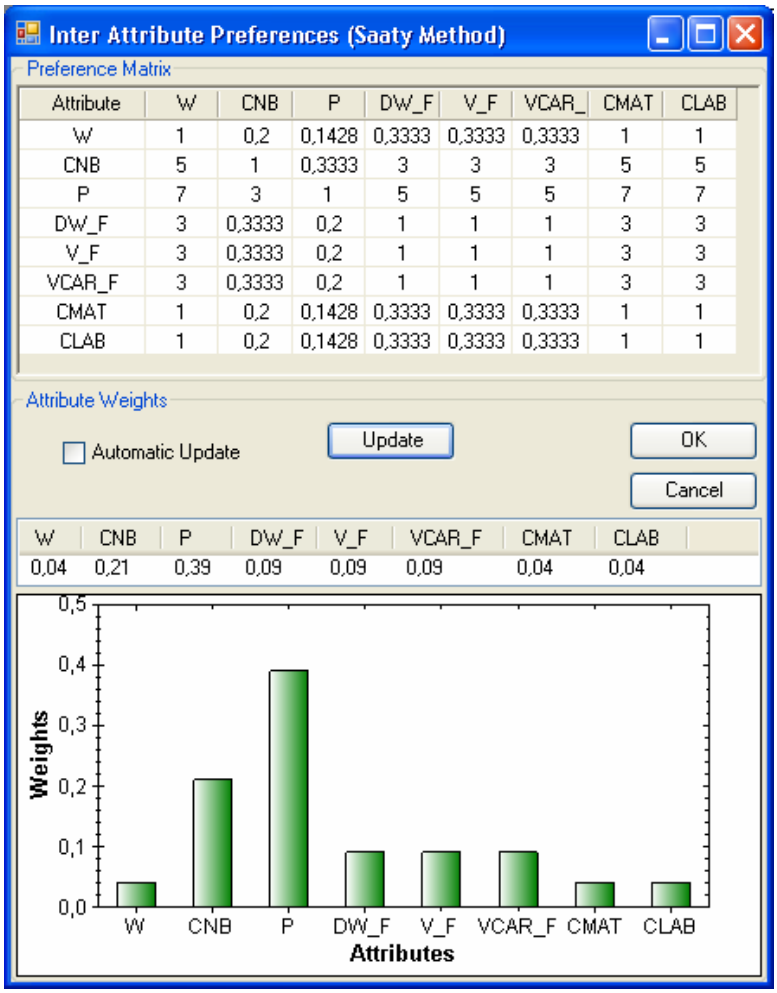
Nakon što su zadane preferencija unutar svakog pojedinog atributa, slijedi određivanje subjektivnih relativnih preferencija među atributima. U skladu s primijenjenom optimizacijskom metodom višeatributnog odlučivanja opisanom u Poglavlju 12.2.2, zadana je sljedeća matrica subjektivnih relativnih preferencija između pojedinih atributa.

| | $W_{st}$ | $C_{mat}$ | $C_{lab}$ | *DW* | $V_{car}$ | $v_{tr}$ | $C_{nb}$ | *P* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $W_{st}$ | 1 | 1 | 1 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1/5 | 1/7 |
| $C_{mat}$ | 1 | 1 | 1 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1/5 | 1/7 |
| $C_{lab}$ | 1 | 1 | 1 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1/5 | 1/7 |
| *DW* | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1/3 | 1/5 |
| $V_{car}$ | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1/3 | 1/5 |
| $v_{tr}$ | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1/3 | 1/5 |
| $C_{nb}$ | 5 | 5 | 5 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1/3 |
| *P* | 7 | 7 | 7 | 5 | 5 | 5 | 3 | 1 |

Tablica 30 Zadane preferencije među atributima Aframax tankera

Subjektivne relativne preferencije među atributima su zadane na način da se respektira jedno od osnovnih načela nove metodologije: u procesu odlučivanja sudjeluju projektant, menadžment brodogradilišta i menadžment pomorske kompanije. Zbog toga je profit broda *P* najjače preferiran, nakon toga je preferirana cijena novogradnje $C_{nb}$, pa atributi koji su ujedno projektni zahtjevi i garantirane karakteristike broda (ukupna nosivost *DW*, volumen teretnih tankova $V_{car}$ i brzina broda $v_{tr}$. Najslabije su preferirani atributi koji mogu biti zanimljivi isključivo brodogradilištu i to samo u određenim situacijama, dok pomorskoj kompaniji nisu od značaja.

Narednom slikom su grafički prikazane preferencije između parova atributa i pripadne težinske funkcije.




| Attribute | W | CNB | P | DW_F | V_F | VCAR_ | CMAT | CLAB |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| W | 1 | 0,2 | 0,1428 | 0,3333 | 0,3333 | 0,3333 | 1 | 1 |
| CNB | 5 | 1 | 0,3333 | 3 | 3 | 3 | 5 | 5 |
| P | 7 | 3 | 1 | 5 | 5 | 5 | 7 | 7 |
| DW_F | 3 | 0,3333 | 0,2 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 |
| V_F | 3 | 0,3333 | 0,2 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 |
| VCAR_F | 3 | 0,3333 | 0,2 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 |
| CMAT | 1 | 0,2 | 0,1428 | 0,3333 | 0,3333 | 0,3333 | 1 | 1 |
| CLAB | 1 | 0,2 | 0,1428 | 0,3333 | 0,3333 | 0,3333 | 1 | 1 |

| W | CNB | P | DW_F | V_F | VCAR_F | CMAT | CLAB |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,04 | 0,21 | 0,39 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,04 | 0,04 |

Slika 39 Grafički prikaz međuatributnih preferencija kod osnivanja Aframax tankera

### 14.4.5 Projektni ciljevi $\boldsymbol{o} = \{\boldsymbol{o}_{dsgn}, \boldsymbol{o}_{exp}\}$

Projektni ciljevi su prethodno opisani u Poglavljima 8, 10 i 11. Nadalje su, zbog preglednosti, samo rekapitulirani. Projektni ciljevi su:

- Minimiziranje snage porivnog stroja,
- Minimiziranje mase čelične konstrukcije,
- Minimiziranje cijene ugrađenog čelika,
- Minimiziranje cijene rada (procesa),
- Minimiziranje cijene koštanja broda,
- Maksimiziranje profita broda.

## 14.5 Variranje projektnih varijabli

Projektne varijable: duljina između okomica $L_{pp}$, širina B, maksimalni gaz $d_s$ i koeficijent punoće $C_B$ se variraju zadanim koracima između pripadnih minimalnih i maksimalnih vrijednosti. Prilikom zadavanja koraka treba obratiti pažnju da njihova veličina bude u razumnim okvirima. Grubi (veliki) korak pojednostavnjuje provođenje postupka optimizacije, ali povećava opasnost da se ne pronađe globalni optimum. Obrnuto, sitan korak komplicira provođenje postupka optimizacije, a pored toga ne vodi projektnim rješenjima koja su u praksi izvediva.

Temeljem iznesenih stavova određeni su sljedeći koraci:

| varijabla | donja granica | korak | gornja granica |
|---|---|---|---|
| $L_{pp}$ (m) | 234.0 | 1.0 | 260.0 |
| $B$ (m) | 40.0 | 0.2 | 45.0 |
| $d_s$ (m) | 14.6 | 0.1 | 16.2 |
| $C_B$ (-) | 0.78 | 0.0001 | 0.835 |
| $V_{car}$ ($m^3$) | 127600 | 10 | 128400 |
| $v_{tr}$ (čv) | 14.7 | 0.05 | 15.5 |

Tablica 31 Zadani koraci pojedinih atributa Aframax tankera

## 14.6 Približni proračun minimalnog snage nadvođa

Približni proračun minimalnog nadvođa je izrađen za pretpostavljenu konfiguraciju broda s pramčanim kaštelom, palubnim skokom isključivo zbog preluka glavne palube te s računskom duljinom broda većom za 0.5 m od duljine među okomicama (Prilog 1).

## 14.7 Proračun minimalne snage porivnog stroja

U svrhu izrade aproksimativnog izraza za trajnu snagu u službi, unutar prethodno navedenih granica projektnog područja je izrađena baza podataka.

Baza podataka je izrađena na temelju rezultata SEAKING-ovog proračuna za kočenu snagu porivnog stroja, 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 70 modela brodova s po 3 različite brzine unutar sljedećeg područja i odgovarajućih okretaja vijka od 80 do 105 ($min^{-1}$) za šesterocilindarski porivni stroj, odnosno 75 do 100 ($min^{-1}$) za sedmerocilindarski porivni stroj.

| varijabla | donja granica | gornja granica |
|---|---|---|
| Δ (t) | 132800 | 133800 |
| $v_{tr}$ (čv) | 14.6 | 15.2 |
| $L_{pp}$ (m) | 235.0 | 260.0 |
| $B$ (m) | 40.0 | 45.0 |
| $d_s$ (m) | 14.6 | 16.2 |
| $C_B$ (-) | 0.78 | 0.836 |

Tablica 32 Granice baze podataka Aframax tankera

Rezultat regresijske analize [54] je dao sljedeću aproksimaciju za trajnu snagu porivnog stroja 6S60MC-C7 u uvjetima pokusne plovidbe i na maksimalnom gazu (Prilog 2):

$$CSR = 0.052078 L_{pp}^{-0.25687} B^{0.98524} d_s^{0.53325} C_B^{2.2671} v_{tr}^{3.3514} \left(1 - 0.0051597 \frac{L_{pp}}{d_s}\right) \text{(kW)} \tag{14.4}$$

U svrhu zadavanja izraza za trajnu snagu porivnog stroja 7S60MC-C7 u uvjetima pokusne plovidbe i na maksimalnom gazu izvršena je analiza efikasnosti propulzijskog sustava s sljedećim propelerima:

- četverokrilni propeler,
- peterokrilni propeler,
- šesterokrilni propeler.

Analiza je provedena na temelju rezultata ispitivanja prototipnog broda s četverokrilnim propelerom, a sljedećih osnovnih karakteristika:

$L_{pp}$ = 236.0 (m)
$B$ = 42.00 (m)
$d_s$ = 15.00 (m)
$C_B$ = 0.8320
Porivni stroj 6S60MC-C7
$CSR$ = 12200 (kW) / 105 ($\text{min}^{-1}$)
$v_{tr}$ = 15.0 (čv)

Promjer svih propelera je ograničen na maksimalni promjer od $D_{prop\ max}$ = 7.8 m, dok su okretaji su bili zadani prema raspoloživoj snazi porivnog stroja $CSR$ pri okretajima kod kojih je dosegnuta ostvarena brzina prototipnog broda. Rezultat analize [55] je pokazao da je četverokrilni propeler bio efikasniji od prototipa za oko 0.9 %, šesterokrilni propeler za oko 1.3 %, a peterokrilni propeler za oko 1.8 %. Zbog toga je za daljnju razradu matematičkog modela porivnog stroja 7S60MC-C7 odabran peterokrilni propeler s sljedećom aproksimacijom snage:

$$CSR = 0.05114 L_{pp}^{-0.25687} B^{0.98524} d_s^{0.53325} C_B^{2.2671} v_{tr}^{3.3514} \left(1 - 0.0051597 \frac{L_{pp}}{d_s}\right) \text{ (kW)} \tag{14.5}$$

## 14.8 Proračun mase čelične konstrukcije, mase strojo opreme i mase ostale brodske opreme

Proračun sastavnih elemenata vlastite mase broda se računaju na temelju izraza iz Poglavlja 8.5.

1) Masa čelične konstrukcije

$$W_{st} = \left(1 - \frac{5}{100}\right) \left\langle 0.0308 \left[L_{pp}\left(B + 0.85D + 0.15 d_s\right)\right]^{1.36} \left\{1 + \frac{1}{2}\left[\left(C_B - 0.7\right) + \frac{\left(1 - C_B\right)\left(0.8D - d_s\right)}{3 d_s}\right]\right\} + 500 \right\rangle \text{ (t)} \tag{14.6}$$

2) Masa strojo opreme

U slučaju porivnog stroja 6S60MC-C7:

$$W_m = SMCR \frac{850 - 0.0034 SMCR}{7350} \text{ (t)} \tag{14.7}$$

U slučaju porivnog stroja 7S60MC-C7:

$$W_m = SMCR \frac{1080 - 0.0034 SMCR}{7350} \text{ (t)} \tag{14.8}$$

gdje je:

$$SMCR = \frac{CSR}{0.9} \qquad \text{maksimalna selektirana snaga porivnog stroja (kW)} \tag{14.9}$$

3) Masa opreme

$$W_o = \left(0.275 - \frac{L_{pp}}{1620}\right) L_{pp} B \text{ (t)} \tag{14.10}$$

## 14.9 Proračun ukupnog zatvorenog volumena broda

Za izračun cijene rada (procesa) u skladu s proračunom iz poglavlja 7.6.2, potrebno je odrediti ukupni zatvoreni volumen broda *V*, koji je definiran na sljedeći način:

$$V = V_D + V_{cam} + V_{\sup} + V_{for} \ (\mathrm{m}^3) \tag{14.11}$$

gdje su:

$V_D$ - volumen trupa broda do visine na boku ($m^3$)
$V_{cam}$ - volumen preluka ($m^3$)
$V_{sup}$ - volumen nadgrađa, konstrukcije ispod dimnjaka ($m^3$)
$V_{for}$ - volumen kaštela ($m^3$)

Volumen trupa broda do visine na boku je definiran kao:

$$V_D = L_{pp} B D C_{BD} \ (\mathrm{m}^3) \tag{14.12}$$

Koeficijent punoće na punoj visini broda na boku $C_{BD}$ je u ovom slučaju definiran sljedećom aproksimacijom (prema svojstvima slične brodske forme):

$$C_{BD} = C_B \left[1 + 0.00726(D - d_s)\right] \tag{14.13}$$

Volumen preluka, nadgrađa i kaštela se mogu procijeniti na sljedeće iznose:

$V_{cam}$ = 3000 ($m^3$)
$V_{sup}$ = 6000 ($m^3$)
$V_{for}$ = 1000 ($m^3$)

## 14.10 Prikaz i diskusija rezultata

Rezultat provedenog optimizacijskog postupka je porodica optimalnih projekata. Na narednim slikama su prikazani nedominirani projekti u različitim višedimenzionalnim koordinatnim sustavima.

Na Slikama 40, 41 i 42 koordinatni sustav je zadan atributima mase čelične konstrukcije $W_{st}$, cijene novogradnje $C_{nb}$ i profita broda *P* na pojedinim koordinatama. Oblikom oznake pojedinog projekta (kocka ili kugla) su označeni pripadni porivni strojevi (projekti označeni kockom imaju veći porivni stroj 7S60MC-C7, a kuglom manji porivni stroj 6S60MC-C7). Veličina kocke, odnosno kugle predstavlja atribut postignute brzine broda $v_{tr}$ (manja kocka, odnosno kugla predstavljaju nižu postignutu brzinu). Spektrom boja je prikazana udaljenost od utopije prema odabranoj metrici (hladni plavi dio spektra predstavlja manju udaljenost, a topli crveni dio spektra veću udaljenost). Utopija (idealno projektno rješenje) je prikazano velikom kuglom roza boje na lijevom gornjem kraju koordinatnog prostora (minimalna masa čelične konstrukcije $W_{st}$ i cijena novogradnje

$C_{nb}$ uz maksimalni profita broda $P$. Selektirani (preferirani) projekti su označeni trodimenzionalnim križevima.

Na Slici 40 je odabrana $L_1$ metrika kojom se linearno zbrajaju udaljenosti pojedinih atributa od odgovarajućih svojstava idealnog projektnog rješenja tako da je vodeći atribut s najjačom težinskom funkcijom. Može se uočiti da je prevladavajući broj nedominiranih projekata blizu utopije, odnosno da je najveći broj projekata označen modrom, plavom i zelenom bojom. Iz toga se stoga dade zaključiti da $L_1$ metrika ne pravi velike razlike među pretežnim brojem nedominiranih projekata, pa stoga nije pogodna za kvalitetno odlučivanje prilikom selektiranja preferiranih projekata.

Slika 41 prikazuje isti projektni prostor kao i prethodna slika, osim što je $L_1$ metrika zamijenjena $L_\infty$ metrikom kojom se projektna rješenja vrednuju prema najmanjoj udaljenosti „najlošijeg“ atributa od odgovarajućeg svojstva utopije. I u ovom slučaju se ponavlja slična situacija kao na prethodnoj slici. Također se može zaključiti da ni $L_\infty$ metrika ne razlučuje dovoljno precizno nedominirane projekte, te da stoga nije pogodna za kvalitetno selektiranje preferiranih projekata.

Slikom 42 je prikazan isti projektni prostor, ali ovog puta s $L_2$ metrikom. $L_2$ metrikom se „uprosjećuje“ udaljenost pojedinih atributa od odgovarajućih svojstava idealnog projektnog rješenja, odnosno kriterij je minimalna veličina višedimezionalne spojnice projektnog rješenja i utopije. U ovom je slučaju dobivena kvalitetnija slika nedominiranih projekata s mogućnošću jasnog razaznavanja pojedinih projekata. Osim toga osnovna svojstva $L_2$ metrike su u velikom broju slučajeva najbliža projektantskom razmišljanju prilikom vrednovanja projektnih rješenja. Na slici se može uočiti da su projekti raspoređeni u dvije skupine prema instaliranim porivnim strojevima koji su dominantno utjecali na razliku u cijeni novogradnje $C_{nb}$. Također se može zaključiti da dominantan broj projekata iz obje skupine ima ostvaren visoki profit $P$. Uočljivo je da su, generalno gledajući, projekti s manjim porivnim strojem bliži utopiji.

Obzirom da Pareto fronta obuhvaća projekte s ostvarenom brzinom od 14.7 čv do 15.4 čv, zanimljivo je promotriti utjecaj brzine broda $v_{tr}$ na realizirani profit $P$. Stoga je na Slici 43 prikazan koordinatni sustav s brzinom $v_{tr}$, cijenom novogradnje $C_{nb}$ i profitom broda $P$ na koordinatnim osima. Veličina kocke, odnosno kugle predstavlja selektiranu maksimalnu snagu porivnog stroja *SMCR* (manja kocka, odnosno kugla predstavljaju manju snagu). Odabrana metrika $L_2$ je predstavljena spektrom (kao i na prethodnoj Slici 42). Ovaj je prikaz olakšao odabir preferiranih projekata. Može se uočiti da snaga porivnog stroja *SMCR* raste od nižih brzina prema višima, te od novogradnji s višom cijenom $C_{nb}$ prema novogradnjama s nižom cijenom. Prva je konstatacija razumljiva sama po sebi – porast brzine uzrokuje eksponencijalni porast snage porivnog stroja. Drugo zapažanje ima nešto složenije obrazloženje – jeftinije novogradnje su koncentrirane u projektnom području s manjom duljinom broda $L_{pp}$ i većim blok koeficijentom $C_B$, što je hidrodinamički i propulzijski nepovoljno, odnosno povećava snagu otpora uz pogoršanje slike sustrujanja.

Preferirani projekti su selektirani na sljedeći način: odabrana su dva projekta s apsolutno najvećim ostvarenim profitima $P$ (jedan u kategoriji projekata s manjim, a drugi u

kategoriji s većim porivnim strojem), dva su projekta selektirana prema najnižoj cijeni novogradnje $C_{nb}$ (ponovno jedan s manjim i jedan s većim porivnim strojem), izabrana su dva projekta s najvećim profitima $P$ uz uvjet ostvarene zahtijevane brzine $v_{tr}$ od 15.1 čv (po jedan s manjim i većim porivnim strojem) te naposljetku jedan projekt koji je najbliži utopiji prema svim trima metrikama.

Preferirani projekti su prikazani na Slici 44. Koordinatni sustav, veličina oznaka i boja su jednako zadani kao na Slici 42. Stoga se može reći da je Slika 44 jednaka Slici 42, samo s izostavljenim nepreferiranim projektima. Svi preferirani projekti su projicirani na svim koordinatnim ravninama, pa se lako mogu uočiti realizirane vrijednosti tih atributa. Od sedam prikazanih projekata šest ih ima profit u gornjoj polovini realiziranih profita svih nedominiranih projekata, a dva su u samom vrhu. Udaljenost od utopije varira.

Slika 45 služi za daljnju analizu utjecaja osnovnih projektnih varijabli $L_{pp}$, $B$, $d_s$ i $C_B$ na oblik i smještaj Pareto fronte. Koordinatni sustav je zadan varijablama duljine među okomicama $L_{pp}$, širine $B$ i maksimalnog gaza $d_s$. Oblikom oznake pojedinog projekta (kocka ili kugla) su, kao i u prethodnim slučajevima, označeni pripadni porivni strojevi. Veličina kocke, odnosno kugle predstavlja blok koeficijent $C_B$ (manja kocka, odnosno kugla predstavljaju manji blok koeficijent). Spektrom boja je prikazana udaljenost od utopije prema $L_2$ metrici. Može se ustanoviti da se najveći broj nedominiranih projekata smjestio u području visokog gaza, velike duljine, male širine i niskog blok koeficijenta. Ovakva situacija je očekivana jer je atribut profita $P$ zadan kao dominantan, što ima za posljedicu minimiziranje angažirane snage porivnog stroja $CSR$ (odnosno selektirane maksimalne snage porivnog stroja $SMCR$), a s tim i potroška goriva i troškova eksploatacije broda. Ovakav je zaključak potpuno opravdan obzirom na hidrodinamiku broda, jer forme s većom duljinom i gazom, manjim blok koeficijentom i većim omjerom $L_{pp}/B$ imaju povoljnija hidrodinamička i propulzijska svojstva.

Na Slici 46 su prikazani preferirani projekti na paralelnim osima i pripadni alfanumerički podaci. Na dnu slike su preferirani projekti prikazani na pojedinim ordinatama, a neponderirano subjektivno zadovoljstvo realiziranim vrijednostima pojedinih projektnih atributa je prikazano raznobojnim linijama s pripadnim oznakama. Po sredini slike je prikaz u kojem je situacija obrnuta: neponderirano subjektivno zadovoljstvo realiziranim vrijednostima pojedinih projektnih atributa je prikazano na pripadnim ordinatama, a preferirani projekti su prikazani raznobojnim linijama s pripadnim oznakama. Gornji dio slike zauzimaju alfanumerički podaci preferiranih projekata.

Može se uočiti da je najveći profit $P$ ostvario projekt br. 4 koji je na gornjem grafu označen crvenom linijom s malim kružićima, a na donjem se nalazi na prvoj ordinati. Stupanj subjektivnog zadovoljstva realiziranim vrijednostima atributa cijene novogradnje $C_{nb}$, cijene materijala $C_{mat}$ i cijene rada $C_{lab}$ je zadovoljavajući, a stupanj subjektivnog zadovoljstva realizacijom ostalih atributa (mase čelične konstrukcije $W_{st}$, ukupne nosivosti $DW$, brzine $v_{tr}$ i volumena teretnih tankova $V_{car}$) je na samoj donjoj granici.

Projekt br. 367 koji je na gornjem grafu označen zelenom linijom s malim zvjezdicama, a na donjem se nalazi na šestoj ordinati ima diskretno manji profit $P$ i veći porivni stroj. Subjektivno zadovoljstvo realiziranim vrijednostima cijene novogradnje $C_{nb}$, cijene

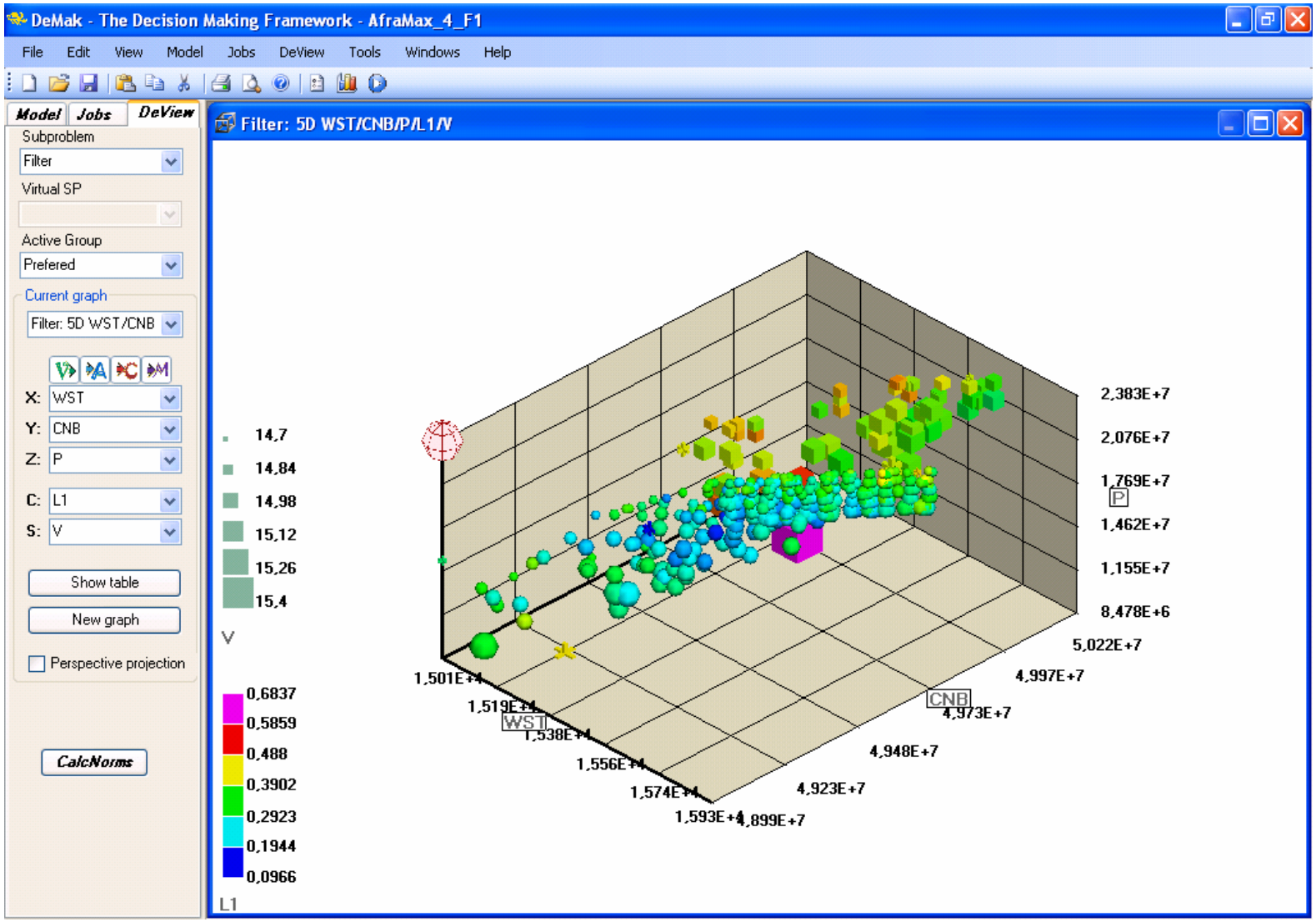
materijala $C_{mat}$ i brzine $v_{tr}$ je na donjoj granici, dok je zadovoljstvo ostalim projektnim atributima (cijene rada $C_{lab}$, mase čelične konstrukcije $W_{st}$, ukupne nosivosti $DW$ i volumena teretnih tankova $V_{car}$) zadovoljavajuće i bolje nego kod prethodnog projekta br. 4.

Projekti koji zadovoljavaju traženu brzinu su projekt br. 6 (s većim porivnim strojem) i projekt br. 497 (s manjim porivnim strojem). Projekt br 6 na gornjem grafu je označen zelenom linijom s malim kvadratićima, a projekt br. 497 svjetloplavom linijom s malim trokutićima. Na donjem grafu su predstavljeni trećom i sedmom ordinatom. Oba projekta nemaju atributa čije su vrijednosti kritične, odnosno na donjoj granici subjektivnog zadovoljstva. Ono po čemu se jako razlikuju je ostvareni profit $P$ (projekt br. 6 je ostvario skoro dvostruko veći profit od projekta br. 497) pa se stoga u međusobnoj usporedbi prednost može dati projektu br. 6.

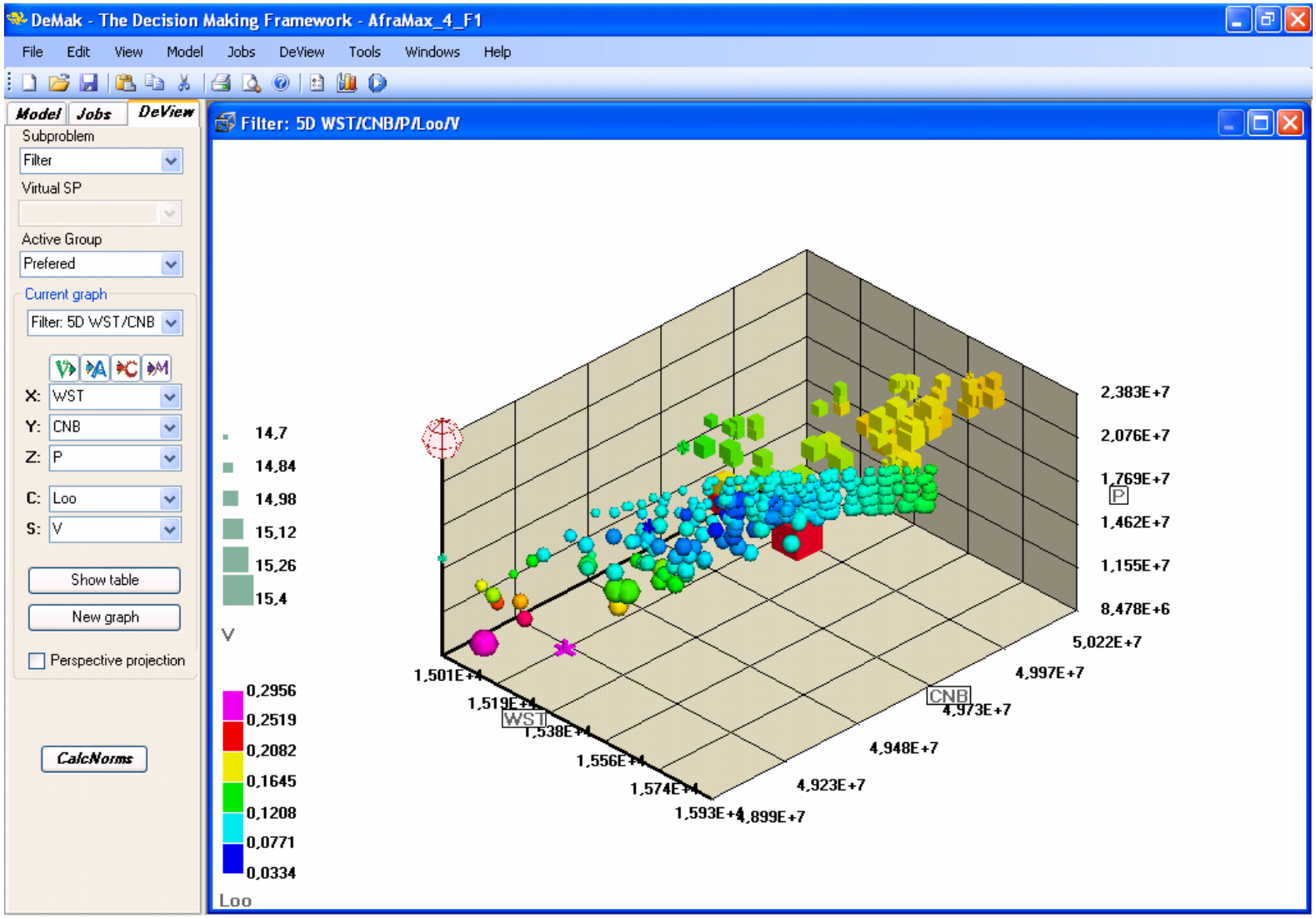
Projekti koji u svojim kategorijama imaju najnižu cijenu novogradnje $C_{nb}$ su projekt br. 5 (s manjim porivnim strojem) i projekt br. 296 (s većim porivnim strojem). Predstavljeni su modrom linijom s malim kružićima, odnosno ljubičastom linijom s poprečnim crticama na gornjem grafu, dok se na donjem grafu nalaze na drugoj i petoj ordinati. Sličnih su karakteristika: projektu br. 5 je kritična brzina $v_{tr}$ koja je na donjoj granici, a projektu br. 296 je kritičan realizirani volumen teretnih tankova $V_{car}$. Cijena novogradnje $C_{nb}$ i profit $P$ su im skoro isti.

Posljednji preferirani projekt je projekt br. 80 koji ima najmanju udaljenost od ideala prema svim metrikama. Na gornjem je grafu označen plavom linijom s malim trokutićima, a na donjem grafu se nalazi na četvrtoj ordinati. Lijepo se može uočiti da je subjektivno zadovoljstvo realiziranim vrijednostima svih atributa vrlo visoko. Tri najlošija atributa su cijena rada $C_{lab}$, cijena materijala $C_{mat}$ i masa čelične konstrukcije $W_{st}$, ali je i u njihovom slučaju stupanj subjektivnog zadovoljstva čak oko 0.6. Stupanj subjektivnog zadovoljstva ispunjenjem svih ostalih atributa se kreće od 0.85 do 1. Ostvaren je profit $P$ od cca 19 milijuna US$, što je za 20-tak posto niže od maksimalno ostvarenog profita, ali uz nešto nižu cijenu novogradnje $C_{nb}$ i višu ostvarenu brzinu $v_{tr}$. Moglo bi se zaključiti da je razlika u ostvarenoj brzini (0.15 čv) između projekta br. 80 i projekta br. 4 koji ima najveći ostvareni profit značajnim dijelom uzrokovala razliku u ostvarenom profitu od cca 4.8 milijuna US$.

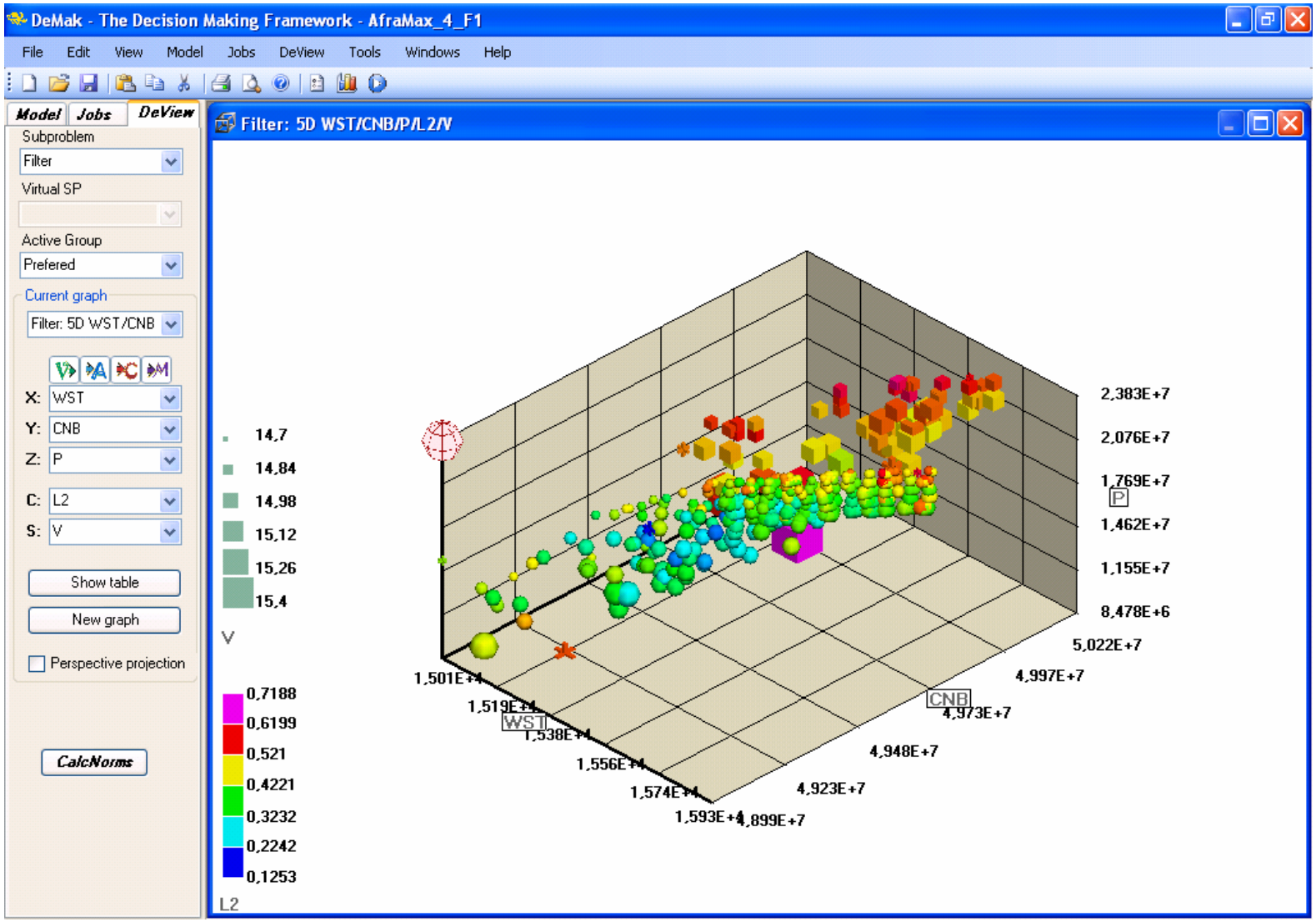
Na Slici 47 koja je posljednja iz ove serije su prikazani isti preferirani projekti, samo su grafovi prikazani s utjecajem pripadnih težinskih faktora. Grafovi su manje pregledni nego na prethodnoj slici jer se linije koje označavaju projekte, odnosno atribute nalaze jedna blizu druge, ali nam ovakav prikaz daje realnu sliku koliki je utjecaj realizacije pojedinog atributa na kvalitetu projekta. Na donjem se grafu može uočiti da se zelena linija s malim kvadratićima koja predstavlja ponderirano subjektivno zadovoljstvo ostvarenim profitom $P$ nalazi dosta iznad linija koje predstavljaju ostale atribute, što znači da je i utjecaj profita adekvatno veći. Na gornjem grafu se ta ista situacija može zapaziti u vidu vrha svih linija koji se nalazi na ordinati koja predstavlja ponderirano subjektivno zadovoljstvo ostvarenim profitom $P$.



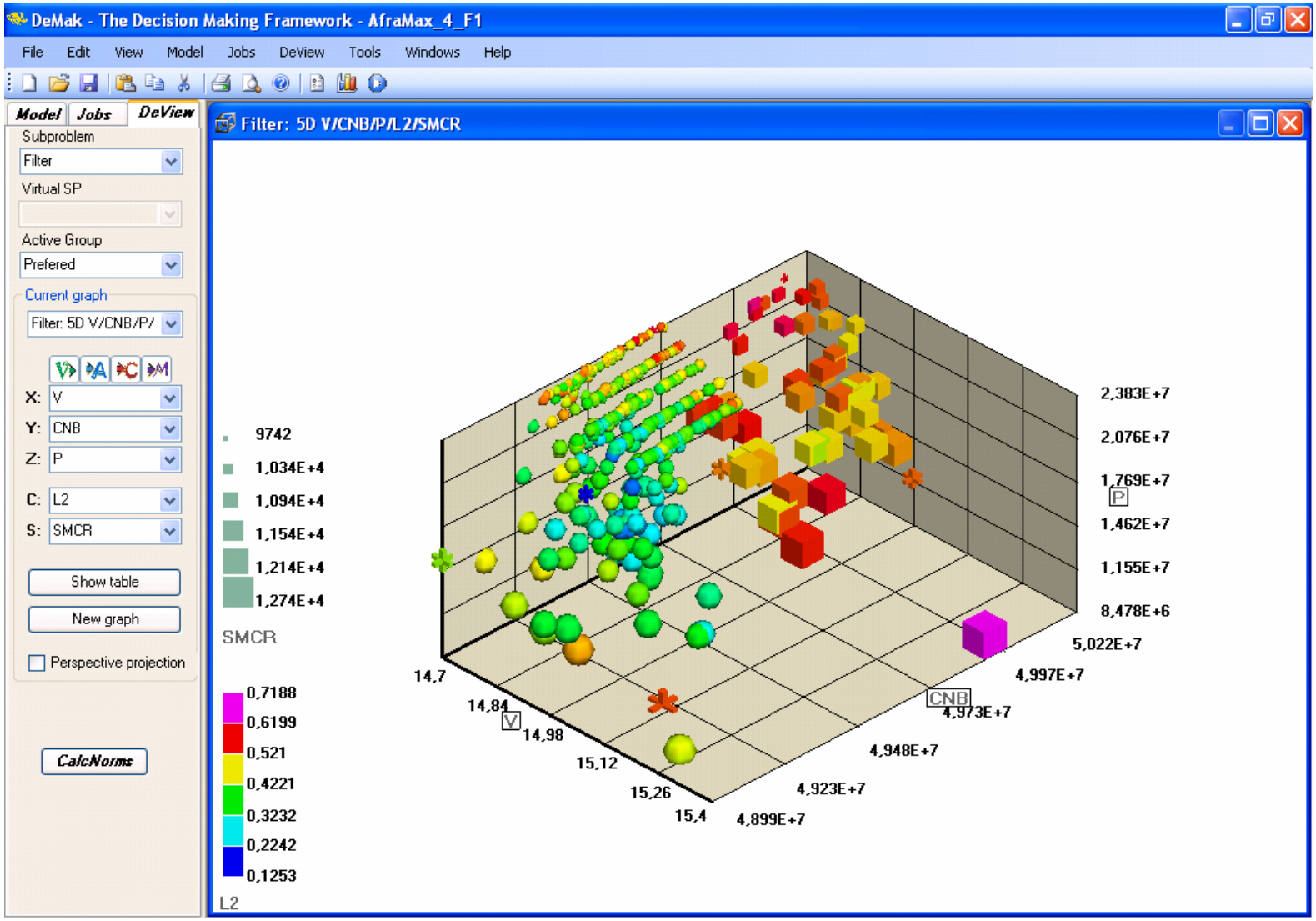

Slika 40 Nedominirani projekti Aframax tankera u $W_{st}$ – $C_{nb}$ – $P$ – $v_{tr}$ prostoru s $L_1$ metrikom



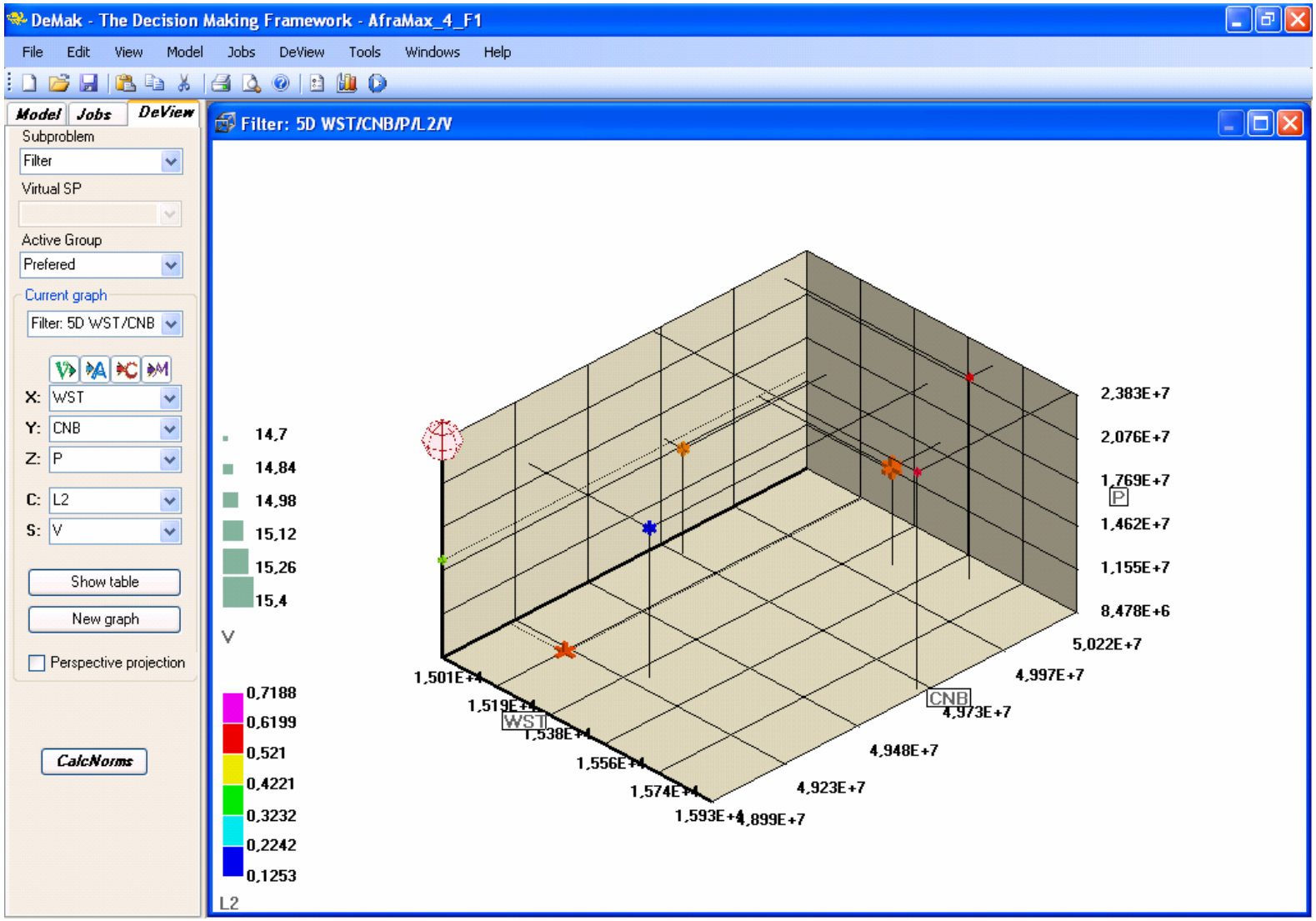

Slika 41 Nedominirani projekti Aframax tankera u $W_{st}$ – $C_{nb}$ – $P$ – $v_{tr}$ prostoru s $L_\infty$ metrikom



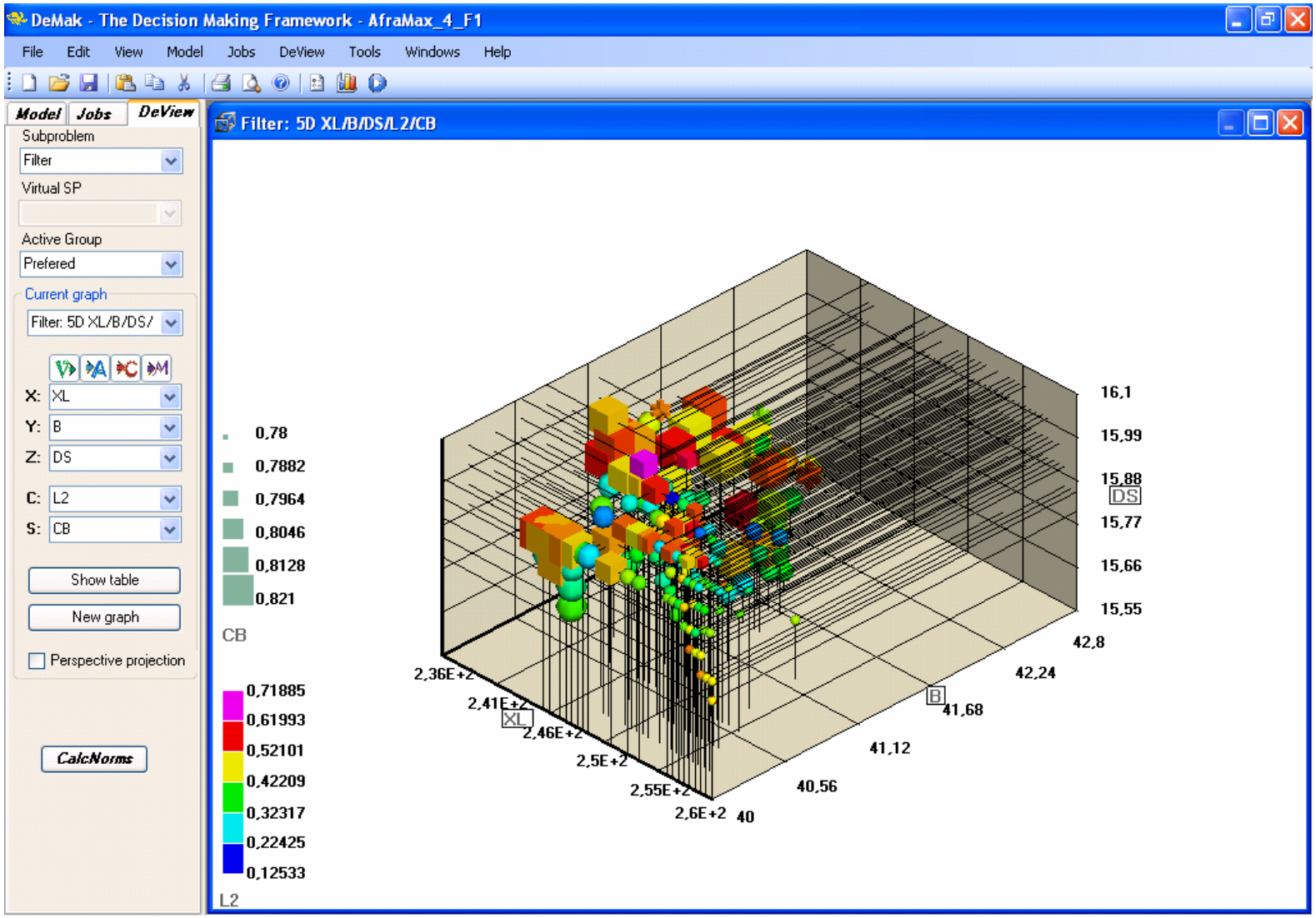

Slika 42 Nedominirani projekti Aframax tankera u $W_{st}$ – $C_{nb}$ – $P$ – $v_{tr}$ prostoru s $L_2$ metrikom



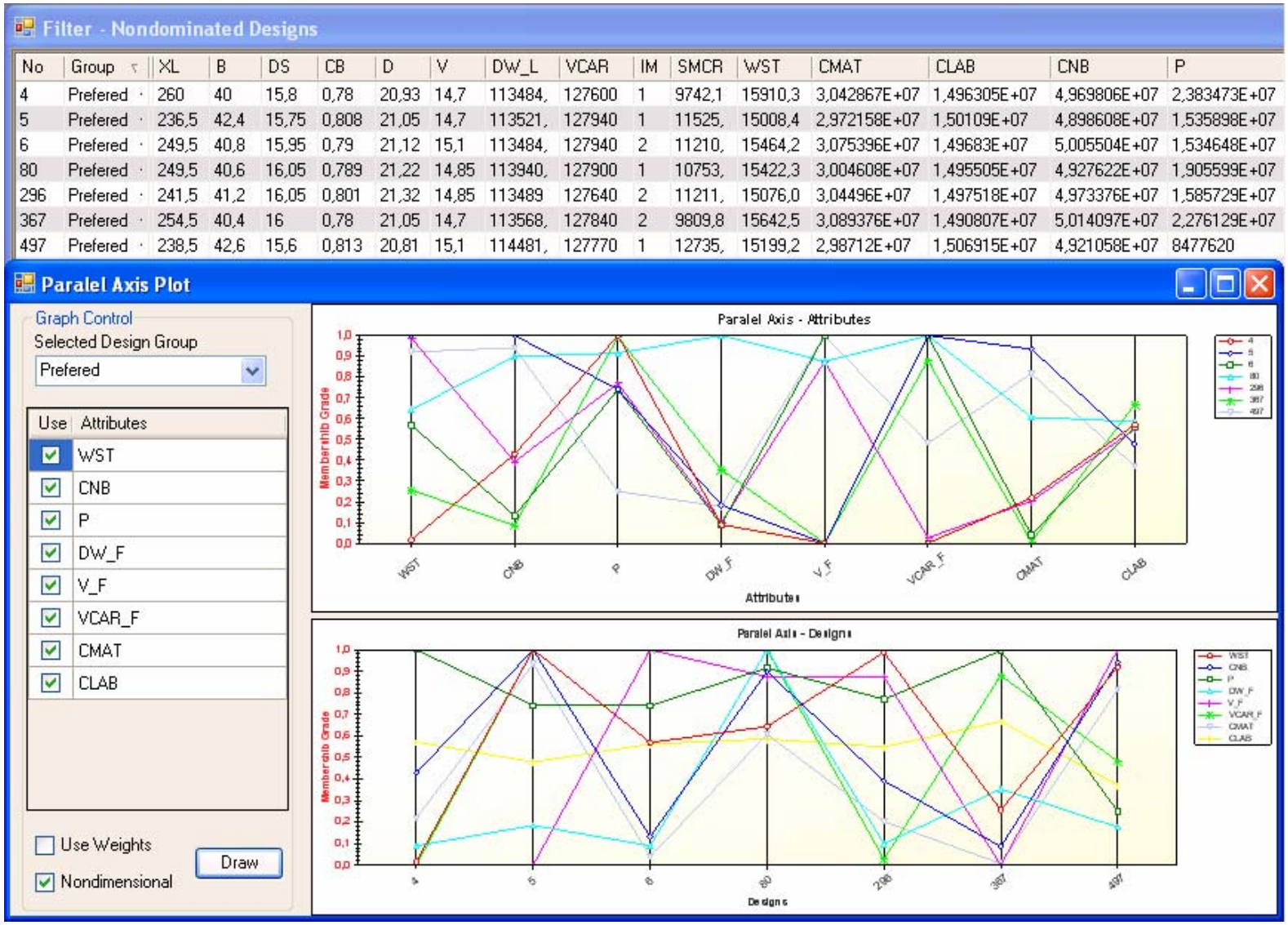

Slika 43 Nedominirani projekti Aframax tankera u $v_{tr}$ – $C_{nb}$ – $P$ – $SMCR$ prostoru s L2 metrikom




Slika 44 Preferirani projekti Aframax tankera u $W_{st}$ – $C_{nb}$ – $P$ – $v_{tr}$ prostoru s $L_2$ metrikom (1)

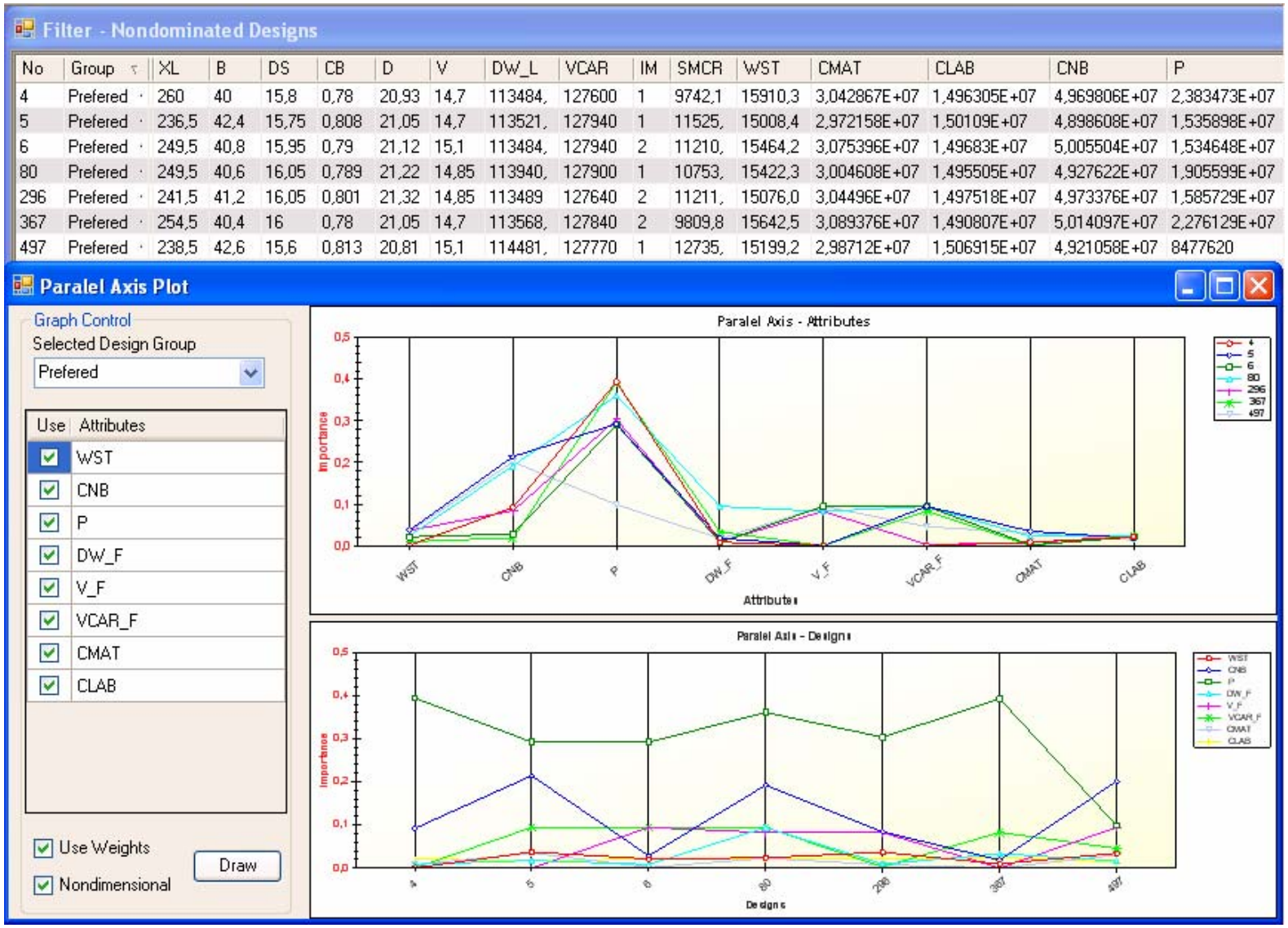



Slika 45 Nedominirani projekti Aframax tankera u $L_{pp} - B - d_s - C_B$ prostoru s $L_2$ metrikom




| No | Group | XL | B | DS | CB | D | V | DW_L | VCAR | IM | SMCR | WST | CMAT | CLAB | CNB | P |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | Prefered | 260 | 40 | 15,8 | 0,78 | 20,93 | 14,7 | 113484, | 127600 | 1 | 9742,1 | 15910,3 | 3,042867E+07 | 1,496305E+07 | 4,969806E+07 | 2,383473E+07 |
| 5 | Prefered | 236,5 | 42,4 | 15,75 | 0,808 | 21,05 | 14,7 | 113521, | 127940 | 1 | 11525, | 15008,4 | 2,972158E+07 | 1,50109E+07 | 4,898608E+07 | 1,535898E+07 |
| 6 | Prefered | 249,5 | 40,8 | 15,95 | 0,79 | 21,12 | 15,1 | 113484, | 127940 | 2 | 11210, | 15464,2 | 3,075396E+07 | 1,49683E+07 | 5,005504E+07 | 1,534648E+07 |
| 80 | Prefered | 249,5 | 40,6 | 16,05 | 0,789 | 21,22 | 14,85 | 113940, | 127900 | 1 | 10753, | 15422,3 | 3,004608E+07 | 1,495505E+07 | 4,927622E+07 | 1,905599E+07 |
| 296 | Prefered | 241,5 | 41,2 | 16,05 | 0,801 | 21,32 | 14,85 | 113489 | 127640 | 2 | 11211, | 15076,0 | 3,04496E+07 | 1,497518E+07 | 4,973376E+07 | 1,585729E+07 |
| 367 | Prefered | 254,5 | 40,4 | 16 | 0,78 | 21,05 | 14,7 | 113568, | 127840 | 2 | 9809,8 | 15642,5 | 3,089376E+07 | 1,490807E+07 | 5,014097E+07 | 2,276129E+07 |
| 497 | Prefered | 238,5 | 42,6 | 15,6 | 0,813 | 20,81 | 15,1 | 114481, | 127770 | 1 | 12735, | 15199,2 | 2,98712E+07 | 1,506915E+07 | 4,921058E+07 | 8477620 |

Slika 46 Preferirani projekti Aframax tankera prikazani na paralelnim osima (1)




| No | Group | XL | B | DS | CB | D | V | DW_L | VCAR | IM | SMCR | WST | CMAT | CLAB | CNB | P |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | Prefered | 260 | 40 | 15,8 | 0,78 | 20,93 | 14,7 | 113484, | 127600 | 1 | 9742,1 | 15910,3 | 3,042867E+07 | 1,496305E+07 | 4,969806E+07 | 2,383473E+07 |
| 5 | Prefered | 236,5 | 42,4 | 15,75 | 0,808 | 21,05 | 14,7 | 113521, | 127940 | 1 | 11525, | 15008,4 | 2,972158E+07 | 1,50109E+07 | 4,898608E+07 | 1,535898E+07 |
| 6 | Prefered | 249,5 | 40,8 | 15,95 | 0,79 | 21,12 | 15,1 | 113484, | 127940 | 2 | 11210, | 15464,2 | 3,075396E+07 | 1,49683E+07 | 5,005504E+07 | 1,534648E+07 |
| 80 | Prefered | 249,5 | 40,6 | 16,05 | 0,789 | 21,22 | 14,85 | 113940, | 127900 | 1 | 10753, | 15422,3 | 3,004608E+07 | 1,495505E+07 | 4,927622E+07 | 1,905599E+07 |
| 296 | Prefered | 241,5 | 41,2 | 16,05 | 0,801 | 21,32 | 14,85 | 113489 | 127640 | 2 | 11211, | 15076,0 | 3,04496E+07 | 1,497518E+07 | 4,973376E+07 | 1,585729E+07 |
| 367 | Prefered | 254,5 | 40,4 | 16 | 0,78 | 21,05 | 14,7 | 113568, | 127840 | 2 | 9809,8 | 15642,5 | 3,089376E+07 | 1,490807E+07 | 5,014097E+07 | 2,276129E+07 |
| 497 | Prefered | 238,5 | 42,6 | 15,6 | 0,813 | 20,81 | 15,1 | 114481, | 127770 | 1 | 12735, | 15199,2 | 2,98712E+07 | 1,506915E+07 | 4,921058E+07 | 8477620 |

Slika 47 Preferirani projekti Aframax tankera prikazani na paralelnim osima (2)

Zanimljiva je usporedba jednog od kvalitetnih suvremenih Aframax tankera s jednim od preferiranih projekata. U tu svrhu je, pomoću matematičkog modela prezentiranog u radu, izrađen projekt Aframax tankera koji je optimiran isključivo s ciljem minimiziranja cijene novogradnje. Projekt br. 6 je odabran za usporedbu jer na maksimalnom gazu ima ostvarenu brzinu od 15.1 čv, što odgovara traženoj brzini. Usporedba je prikazana sljedećom tablicom.

| Osnovne karakteristike | Projekt | |
|---|---|---|
| | Suvremeni Aframax tanker | Preferirani projekt br. 6 |
| $L_{pp}$ (m) | 238.0 | 249.5 |
| $B$ (m) | 44.0 | 40.8 |
| $d_s$ (m) | 14.9 | 15.95 |
| $C_B$ (-) | 0.826 | 0.790 |
| $D$ (m) | 20.8 | 21.12 |
| $DW$ (t) | 114000 | 113484 |
| $V_{car}$ ($m^3$) | 128000 | 127940 |
| $v_{tr}$ (čv) | 15.1 | 15.1 |
| $CSR$ (kW) | 11920 | 10089 |
| $SMCR$ (kW) | 13244 | 11210 |
| Porivni stroj | 6S60MC-C7 | 7S60MC-C7 |
| $W_{st}$ (t) | 15673 | 15464 |
| $C_{mat}$ (mUS$) | 30.24 | 30.75 |
| $C_{lab}$ (mUS$) | 15.48 | 14.97 |
| $C_{nb}$ (mUS$) | 50.06 | 50.06 |
| $P$ (mUS$) | 0 | 15.35 |

Tablica 33 Usporedba suvremenog Aframax tankera s preferiranim projektom

Može se konstatirati da se osnovne karakteristike prezentiranog projekta suvremenog Aframax tankera gotovo idealno poklapaju s karakteristikama suvremenih Aframax tankera prikazanih u Tablici 18, što dokazuje da se primijenjeni projektni model zasniva na najboljim suvremenim Aframax tankerima. Preferirani projekt br. 6 ostvaruje 15.35 milijuna US$ profita, dok u istim uvjetima poslovanja suvremeni aframax tanker posluje bez profita. Oba projekta imaju istu cijenu koštanja $C_{nb}$.

Osnovna razlika između promatranih projekata je u osnovnim izmjerama i međusobnim odnosima osnovnih izmjera, te u porivnom stroju. Preferirani projekt ima veću duljinu $L_{pp}$ i gaz $d_s$, te sukladno tome, manju širinu $B$ i blok koeficijent $C_B$. Time su ostvareni i hidrodinamički povoljniji odnosi $L_{pp}/B$ i $B/d_s$, te kvalitetnija slika sustrujanja i uvjeti za rad propelera. Osim toga, veći porivni stroj radi pri nižim okretajima, što također dovodi do poboljšanja stupnja djelovanja brodskog vijka. Rezultat toga je sniženje snage porivnog stroja, u konkretnoj usporedbi snaga je niža za preko 18%. To ima za direktnu posljedicu smanjenje potrošnje goriva, troškova putovanja i eksploatacije broda. Također treba

istaknuti ekološke prednosti ovakvog projekta – suvremeno društvo ulaže izuzetne napore za očuvanje okoliša raznim mjerama, pa tako i onima koje se tiču operiranja brodova. Mjere koje su aktualno narinute za smanjenje emisije $CO_2$ iz motora sa unutarnjim sagorijevanjem postižu znatno niže nivoe poboljšanja od nivoa koji je doseziv primjenom nove metodologije projektiranja broda.

Vrlo zanimljive rezultate daje kratka analiza utjecaja ostvarene brzine projekta $v_{tr}$ na ostale atribute, prvenstveno profit broda *P*. Preferirani projekti iz naredne tablice su odabrani po kriteriju najvećeg ostvarenog profita za zadanu brzinu. Odabrani su nedominirani projekti br. 4, 11, 18, 501 i 6 koji su ostvarili brzine od 14.7, 14.8, 14.9, 15.0 i 15.1 čvorova. Preferirani projekt br. 6 je ujedno analiziran u prethodnoj tablici i poslužio je za usporedbu s projektom suvremenog Aframax tankera. U tablici su prikazane samo one karakteristike projekata na koje je ostvarena brzina imala dominantan utjecaj, dok su ostali atributi ispušteni radi jasnoće prikaza.

| Osnovne karakteristike | Preferirani projekti | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | br. 4 | br. 11 | br. 18 | br. 501 | br. 6 |
| $v_{tr}$ (čv) | 14.7 | 14.8 | 14.9 | 15.0 | 15.1 |
| $L_{pp}$ (m) | 260.0 | 260.0 | 260.0 | 256.0 | 249.5 |
| *B* (m) | 40.0 | 40.0 | 40.0 | 40.2 | 40.8 |
| $d_s$ (m) | 15.8 | 15.8 | 15.8 | 16.0 | 15.95 |
| $C_B$ (-) | 0.780 | 0.780 | 0.780 | 0.780 | 0.790 |
| *CSR* (kW) | 8768 | 8969 | 9175 | 9555 | 10089 |
| *SMCR* (kW) | 9742 | 9966 | 10194 | 10617 | 11210 |
| Porivni stroj | 6S60MC-C7 | 6S60MC-C7 | 6S60MC-C7 | 6S60MC-C7 | 7S60MC-C7 |
| $C_{nb}$ (mUS$) | 49.70 | 49.70 | 49.70 | 49.46 | 50.06 |
| *P* (mUS$) | 23.83 | 22.63 | 21.40 | 19.51 | 15.35 |

Tablica 34 Usporedba preferiranih projekata prema ostvarenoj brzini $v_{tr}$

Može se uočiti da prva tri projekta (br. 4, 11 i 18) imaju jednake osnovne izmjere i porivni stroj, pa time i cijenu $C_{nb}$. Razlikuju se samo u dosegnutoj brzini $v_{tr}$ i ona iznosi 14.7, 14.8 i 14.9 čvorova. Utjecaj ovako malih porasta brzine od 0.1 čvora (cca 0.7%) donosi porast snage porivnog stroja *CSR* za oko 200-210 kW, odnosno cca 2.3%. Nadalje, porast brzine od 0.1 čvora ima za posljedicu (u ovom području brzina) pad profita od cca 1.2 milijuna US$. Projekt br. 501 također ima manji porivni stroj, dok mu se osnovne izmjere diskretno razlikuju od izmjera prethodnih projekata. Ostvarena brzina od 15.0 čvorova je imala za posljedicu daljnji rast snage porivnog stroja (u ovom koraku za oko 380 kW, odnosno nešto više od 4%). Slijedom toga profit *P* je snižen za cca 1.9 milijuna US$ i iznosi 19.51 milijun US$. Posljednji promatrani projekt br. 6 se bitno razlikuje od prethodnih projekata. Zbog većeg porivnog stroja je skuplji, a ostvarena brzina $v_{tr}$ od 15.1 čvora je imala za posljedicu porast snage od cca 530 kW (iako izbor većeg stroja

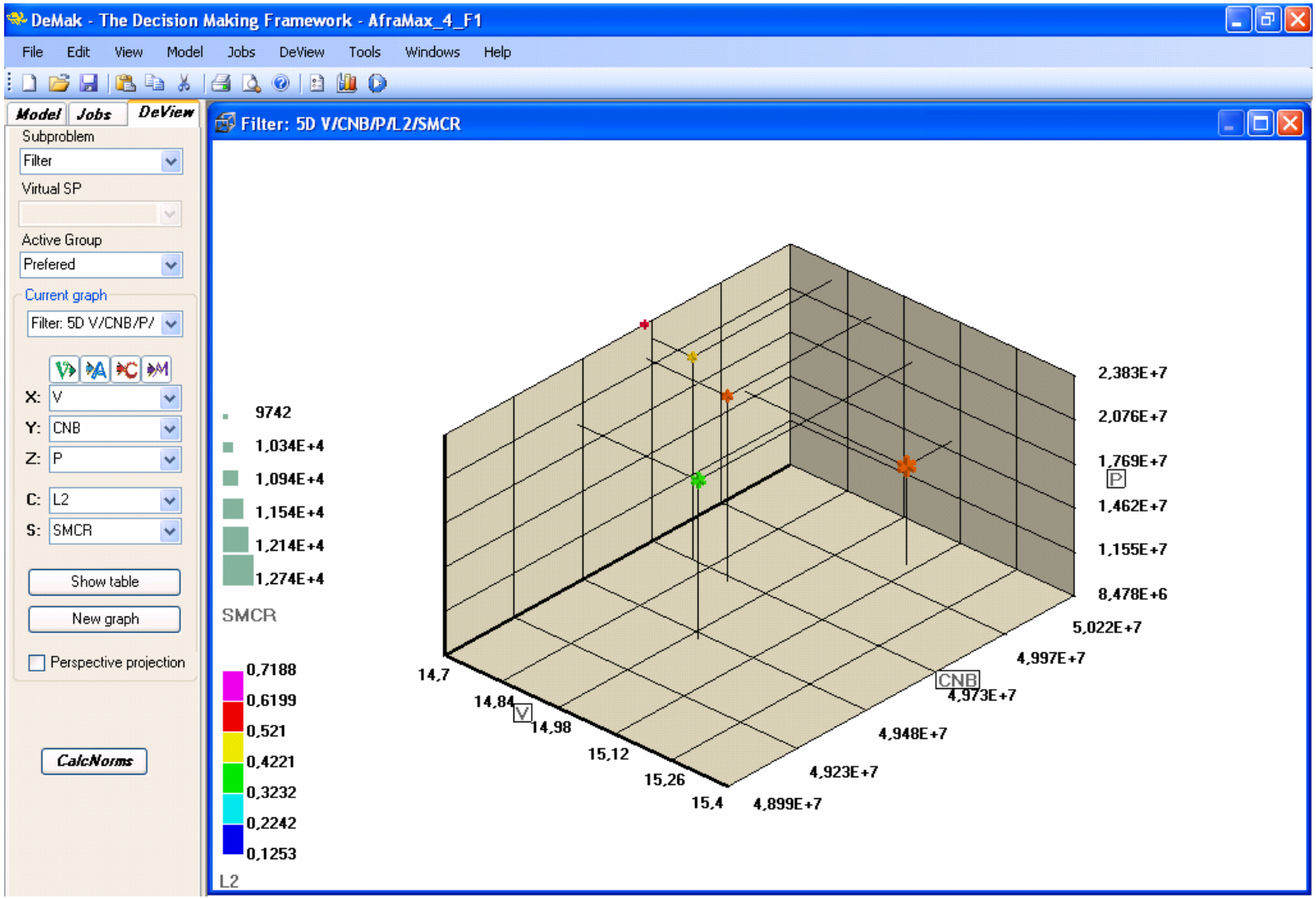
donosi poboljšan stupanj djelovanja propelera), odnosno od oko 5.5%. Profit je dodatno pao za cca 4.2 milijuna US$ i iznosi 15.35 milijuna US$.

Iz prethodno komentiranog se može zaključiti da se daljnja povećanja profita *P*, odnosno smanjenje potrošnje goriva, troškova putovanja i troškova eksploatacije broda mogu postići vrlo diskretnim sniženjem brzine. Ukoliko bi se konačno odabrao projekt br. 501 koji postiže brzinu $v_{tr}$ od 15.0 čvorova (samo 0.1 čvor nižu od zahtijevane) postigla bi se ušteda goriva od cca 25% u odnosu na projekt suvremenog Aframax tankera, a profit bi bio veći za oko 19.5 milijuna US$.

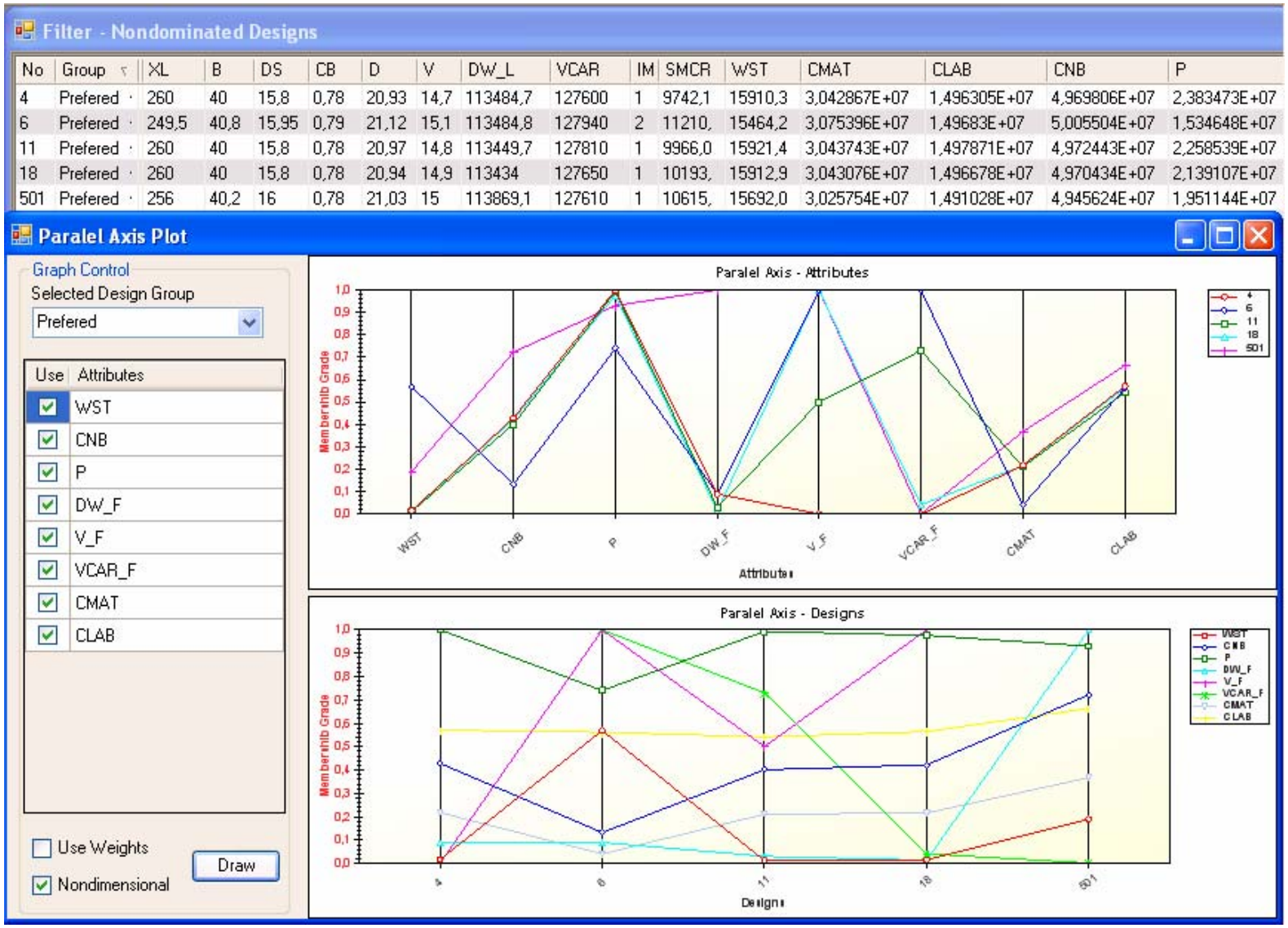
Na sljedećim slikama su prikazani preferirani projekti br. 4, 11, 18, 501 i 6 u višedimenzionalnom koordinatnom sustavu i na paralelnim osima.

Na Slici 48 projekti su prikazani u koordinatnom sustavu s brzinom $v_{tr}$, cijenom novogradnje $C_{nb}$ i profitom *P* na pojedinim koordinatnim osima. Selektirana maksimalna snaga porivnog stroja *SMCR* je predstavljena veličinom oznake, a udaljenost preferiranih projekata od utopije prema odabranoj $L_2$ metrici je predstavljeno spektrom boja. Može se uočiti kako profit eksponencijalno pada s porastom brzine. Preferirani projekti su različito udaljeni od ideala.

Slika 49 prikazuje preferirane projekte na paralelnim osima. Zbog bolje preglednosti prikazani su neponderirani stupnjevi zadovoljstva ostvarenim vrijednostima atributa. Projekt br. 4 je na gornjem grafu označen crvenom linijom s malim kružićima, a na donjem grafu se nalazi na prvoj ordinati. Projekt br. 6 je označen modrom linijom s malim kružićima, odnosno nalazi se na drugoj ordinati. Projekt br. 11 je označen zelenom linijom s malim kvadratićima, a nalazi se na trećoj ordinati. Projekt br. 18 je na gornjem grafu označen plavom linijom s malim trokutićima, a na donjem grafu se nalazi na četvrtoj ordinati. Projekt br. 501 je označen ljubičastom linijom s poprečnim crticama, a nalazi se na petoj ordinati. Može se uočiti da samo projekt br. 6 nema atributa koji je realiziran s kritičnim vrijednostima. Jedino projekt br. 501 ima visok stupanj subjektivnog zadovoljstva ostvarenom vrijednošću atributa ukupne nosivosti *DW*, dok su svi ostali na samoj donjoj granici subjektivnog zadovoljstva. Upravo je obrnuta situacija s zadovoljstvom realiziranim profitom *P*. Jedino projekt br. 501 ima umjeren stupanj subjektivnog zadovoljstva ostvarenom vrijednošću atributa profita *P*, dok svi ostali preferirani projekti imaju realiziran profit s potpunim subjektivnim zadovoljstvom.




Slika 48 Preferirani projekti Aframax tankera u $v_{tr}$ – $C_{nb}$ – $P$ – $SMCR$ prostoru s $L_2$ metrikom (2)




Slika 49 Preferirani projekti Aframax tankera prikazani na paralelnim osima (3)

Uz izloženo, valja voditi računa i o sljedećim aspektima primijenjene projektne metodologije:

1. Nova metodologija ne traži nikakve „revolucionarne“ iskorake u projektiranju koji bi mogli ugroziti ili odložiti njenu primjenu,
2. Nova metodologija omogućava analiziranje utjecajnih parametara na kvalitetu poslovanja broda,
3. Investicijski trošak (cijena novogradnje $C_{nb}$) je isti ili diskretno viši, pa ne povećava rizik investicije i ne predstavlja moguću poteškoću,
4. Drukčijim vrednovanjem međuatributnih odnosa (još „težim“ ponderiranjem profita $P$ u odnosu na ostale atribute) moguće je ostvariti dodatni profit i uštedu goriva.

Obrađeni primjer dokazuje opravdanost primjene nove metodologije i utemeljenost očekivanih rezultata.

## 14.11 Analiza robustnosti nedominiranih projekata Aframax tankera

Analiza robustnosti je provedena u odnosu na projektne parametre koji značajno utječu na rezultat poslovanja brodogradilišta i pomorske kompanije, a koji su u potpunosti izvan mogućnosti kontrole ili barem preciznog predviđanja budućeg kretanja od strane brodogradilišta i pomorske kompanije. Parametri koji imaju dominantan utjecaj na rezultat optimizacijskog postupka osnivanja trgovačkih brodova (prvenstveno na ostvareni profit $P$) su opisani u Poglavlju 6, a nadalje su kratko navedeni:

1. Fluktuacija US$ u odnosu na košaru valuta, prvenstveno € i kune,
2. Cijena brodograđevnog čelika,
3. Cijena pogonskog goriva.

Da bi se omogućila provedba analize robustnosti (odnosno senzitivnosti) projektnih atributa na variranje navedenih dominantnih projektnih parametara, potrebno je parametre varirati u granicama očekivanih minimalnih i maksimalnih vrijednosti. Ovo je prikazano sljedećom tablicom.

| Parametar | Minimalna očekivana vrijednost | Aktualna vrijednost | Maksimalna očekivana vrijednost |
|---|---|---|---|
| $ER$ (-) | 1.25 | 1.35 | 1.45 |
| $c_{st}$ (US$/t) | 600 | 700 | 800 |
| $c_{fuel}$ (US$/t) | 400 | 470 | 540 |

Tablica 35 Variranje projektnih parametara Aframax tankera

Analiza je provedena pomoću ortogonalnog polja L9 prikazanog u Poglavlju 13, Tablica 17, s tim da su iskorištena prva tri stupca matrice.

Dobiveni rezultati su prikazani narednim slikama. Na Slici 50 je prikazan koordinatni sustav s *SNR* mjerom robustnosti, standardnom devijacijom $\sigma$ i profitom *P* na odgovarajućim koordinatnim osima. Spektrom boja je označena $L_2$ metrika (plavi dio spektra je bliži utopiji), a veličinom oznake je označena brzina broda (veća oznaka predstavlja veću brzinu). Kuglama su označeni nedominirani projekti s manjim porivnim strojem, a kockama nedominirani projekti s većim porivnim strojem. Može se uočiti da su projekti raspoređeni u dva usporedna niza u odnosu na odabrane porivne strojeve. Projekti s manjim strojem su pretežno hladnih boja (plavi i zeleni), a projekti s većim strojem su pretežno toplih boja (žuti i crveni), odnosno, projekti s manjim strojem su bliži idealu. Projekti s većim strojem ostvaruju veće brzine. Usporedni nizovi se protežu od projekata s najmanjim profitom, najvećom brzinom, najmanjom mjerom robustnosti i najvećom devijacijom profita prema projektima s najvećim profitom, najmanjom brzinom, najvećom robustnošću i najmanjom devijacijom. Iz tog se zapažanja može izvući vrlo zanimljiv zaključak da projekti koji su uspješniji i s većim profitom ujedno i robustniji na promjene ulaznih parametara, odnosno da rezultati poslovanja broda manje variraju promjenom parametara. Ovakav zaključak potvrđuje očekivanje da su bolji projekti ujedno i robustniji. Razlog tome leži u činjenici da smanjenje potrošnje goriva dominantno utječe na kvalitetu poslovanja broda, pa su stoga projekti s manjom potrošnjom goriva i većim profitom ujedno i robustniji na promjenu cijene goriva kao vodeći remetilački faktor.

Na Slici 51 je prikazan koordinatni sustav s brzinom broda $v_{tr}$, standardnom devijacijom $\sigma$ i *SNR* mjerom robustnosti na odgovarajućim koordinatnim osima. Kao i na prethodnoj slici spektrom boja je označena $L_2$ metrika, dok je veličinom oznake pridjeljena profitu broda *P* (veća oznaka predstavlja veći profit). Kugle i kocke označavaju nedominirane projekte s manjim porivnim strojem i s većim porivnim strojem. Ova slika još jasnije prikazuje utjecaj brzine broda na robustnost projekta. Mogu se uočiti nizovi nedominiranih projektnih rješenja podijeljeni prema ostvarenoj brzini $v_{tr}$. Projekti koji imaju najnižu brzinu ujedno imaju i najveći profit, najveću mjeru robustnosti i najmanju devijaciju.

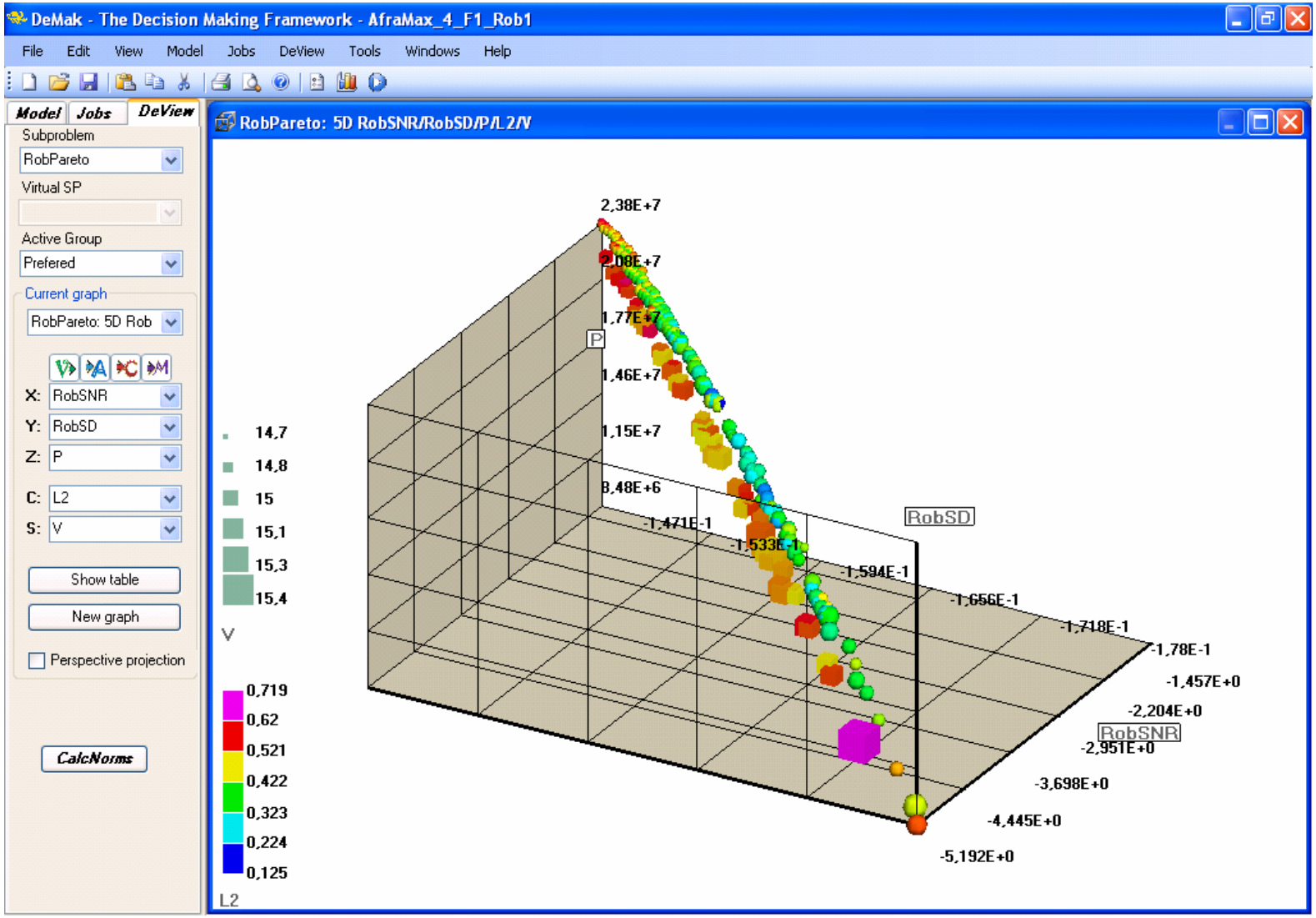
Naredna Slika 52 prikazuje Pareto frontu u koordinatnom sustavu s duljinom broda $L_{pp}$, standardnom devijacijom $\sigma$ i mjerom robustnosti *SNR* na pojedinim koordinatnim osima. Spektrom boja je ponovno označena $L_2$ metrika, dok je veličinom kugli i kocki označen profit broda *P* (veća oznaka predstavlja veći profit). Prikaz je zanimljiv zbog uvida u utjecaj osnovnih izmjera broda (u ovom slučaju duljine broda kao izmjere s dominantnim utjecajem) na ostvareni profit i robustnost projekta. Kao što se može lijepo uočiti, prevladavajući broj nedominiranih projekata velike robustnosti, male devijacije i s većim profitom smjestio se u područje velikih duljina broda. Ova situacija je rezultat utjecaja odabranih glavnih izmjera broda na realizirani profit. Projekti veće duljine $L_{pp}$ (posljedično manjeg blok koeficijenta $C_B$ i povoljnijih omjera $L_{pp}/B$ i $B/d_s$) imaju kvalitetnija hidrodinamička i propulzijska svojstva, pa stoga i nižu angažiranu snagu porivnog stroja i potrošnju goriva. Nadalje to vodi nižim troškovima putovanja $C_{voy}$ i eksploatacije broda $C_{op}$, odnosno većem realiziranom profitu *P*. Takvi projekti su ujedno i robustniji na variranje ulaznih parametara te imaju manju devijaciju realiziranog profita.

Slika 53 omogućuje daljnju analizu utjecaja osnovnih izmjera broda na realizirani profit *P* te robustnost i devijaciju realiziranog profita. Nedominirani projekti su prikazani u koordinatnom sustavu s duljinom broda $L_{pp}$, blok koeficijentom $C_B$ i mjerom robustnosti *SNR* na pojedinim koordinatnim osima. Spektrom boja je označena $L_2$ metrika, a veličinom oznake je označen profit broda *P* (veća oznaka predstavlja veći profit). Prikaz potvrđuje komentare prethodne slike, prevladavajući broj optimalnih projekata se nalazi u području velike duljine broda $L_{pp}$ i niskog blok koeficijenta $C_B$. Ti projekti ujedno imaju veću mjeru robustnosti *SNR* i veći realizirani profit *P*.

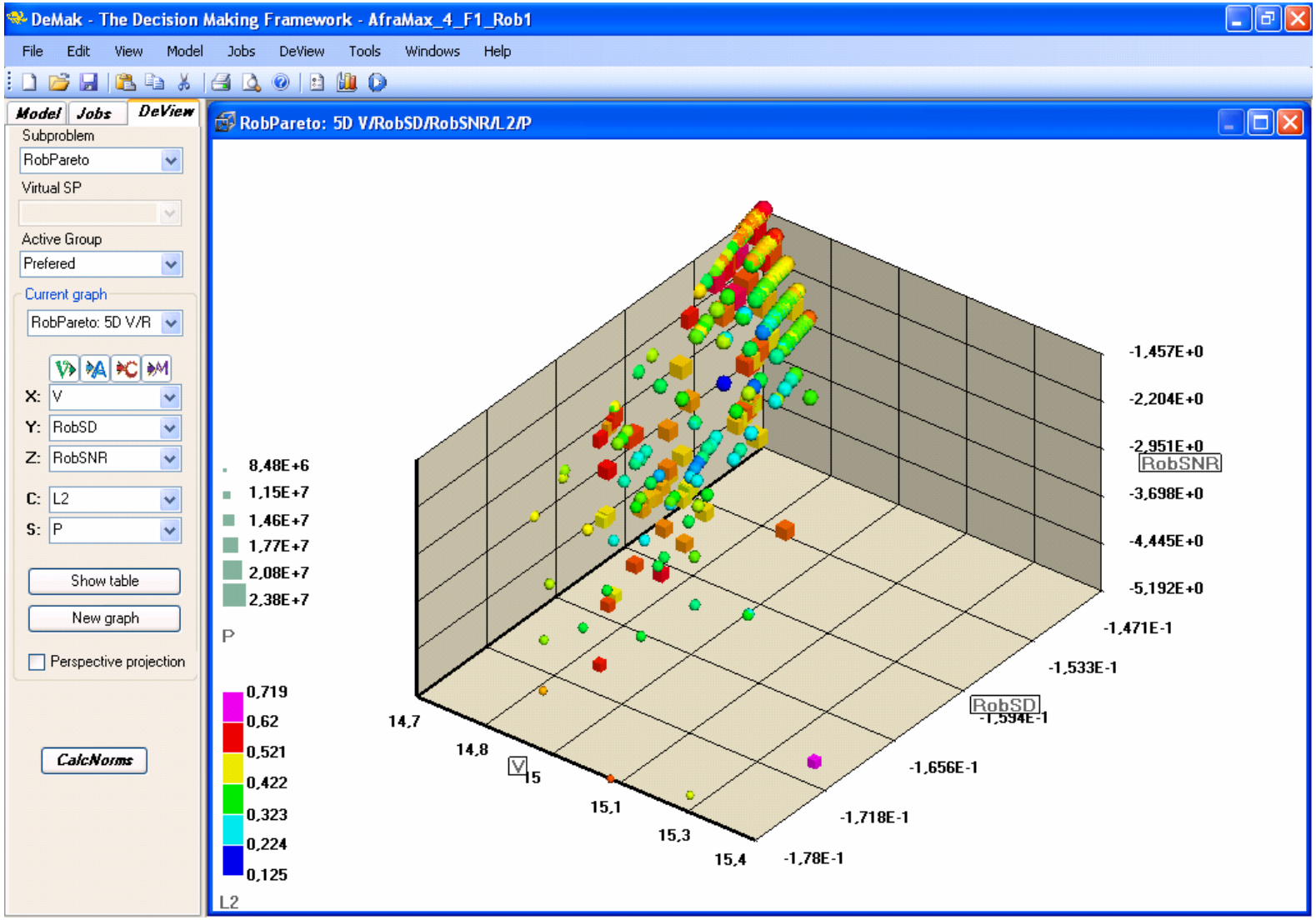
Naredna Slika 54 ima na koordinatnim osima osnovne izmjere broda $L_{pp}$ i *B* te blok koeficijent $C_B$. Mjera robustnosti *SNR* je označena spektrom boja (veća robustnost je predstavljena ljubičasto-crvenim dijelom spektra), standardna devijacija veličinom oznake (manja devijacija je predstavljena većim kuglama, odnosno kockama). Na slici se može jasno uočiti da su robustniji projekti manje devijacije profita koncentrirani u području većih duljina broda $L_{pp}$, manjih širina *B* i blok koeficijenata $C_B$. Ovo dodatno potvrđuje ranije iznijeta zapažanja o utjecaju osnovnih izmjera na realizirani profit broda.

Posljednja iz ove serije je Slika 55. Na njoj je analiziran utjecaj brzine broda $v_{tr}$ i snage porivnog stroja *SMCR* na realizirani profit *P*, standardnu devijaciju profita $\sigma$ i mjeru robustnosti *SNR*. Na pripadnim koordinatnim osima su $v_{tr}$, *SMCR* i *P*. Standardna devijacija je predstavljena veličinom oznake (veće kocke i kugle su manja devijacija), a robustnost je predstavljena spektrom boja (ljubičasto-crveni dio spektra je veća robustnost). I na ovoj slici je lako uočljivo da veći profit i bolju robustnost s manjom devijacijom ostvaruju projekti niže brzine, odnosno niže angažirane snage. Ljubičasto obojane kugle i kocke većih dimenzija koje predstavljaju projekte veće robustnosti s nižim stupnjem devijacije su koncentrirane u području niskih brzina i niskih snaga porivnog stroja.

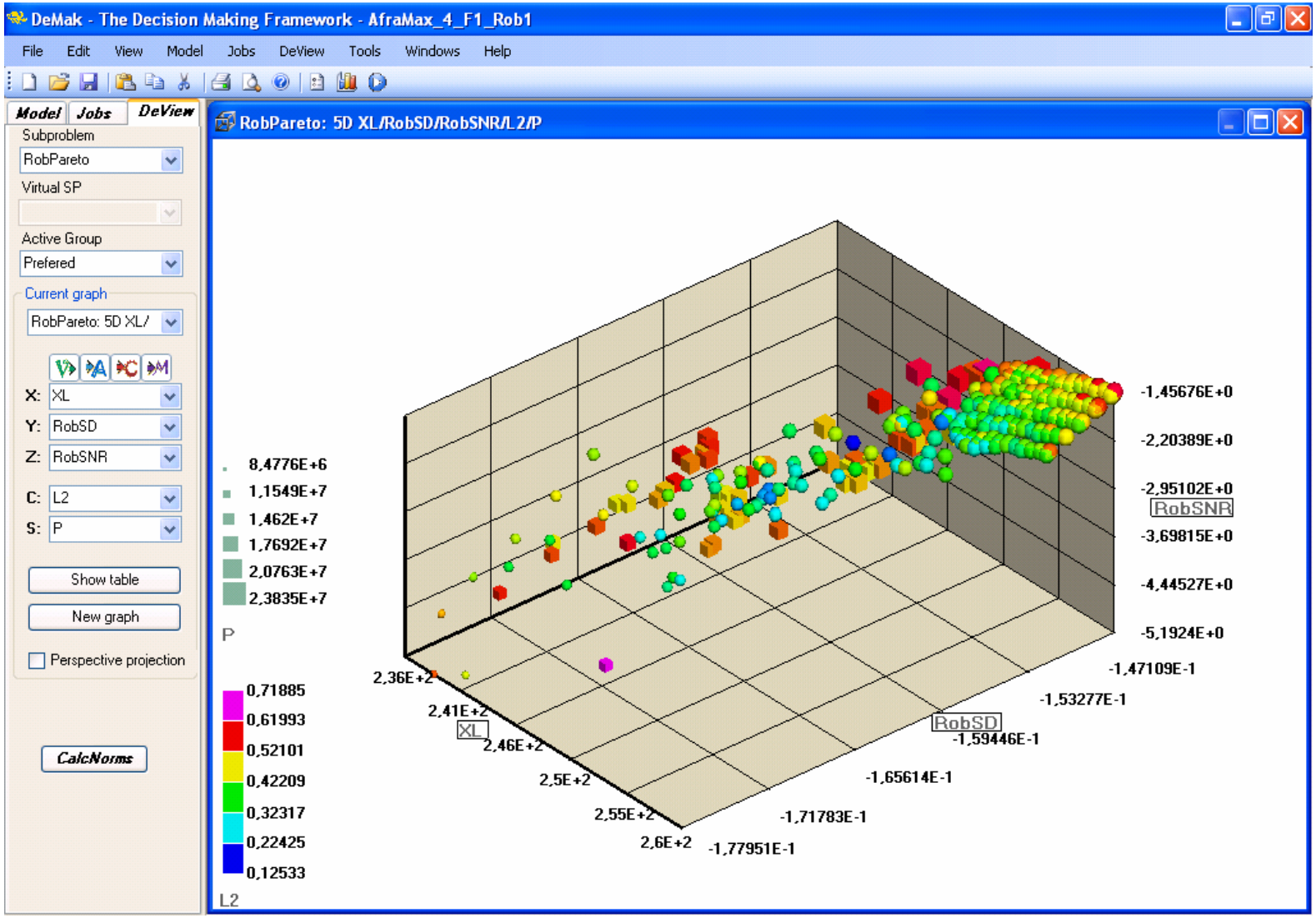
Završni komentar analize robustnosti nedominiranih projekata Aframax tankera koji su rezultat primjene izložene metodologije projektiranja trgovačkih brodova može glasiti da je provedenom analizom robustnosti potvrđena pretpostavka da nova projektna rješenja pokazuju veću robustnost na varijacije utjecajnih ulaznih parametara.



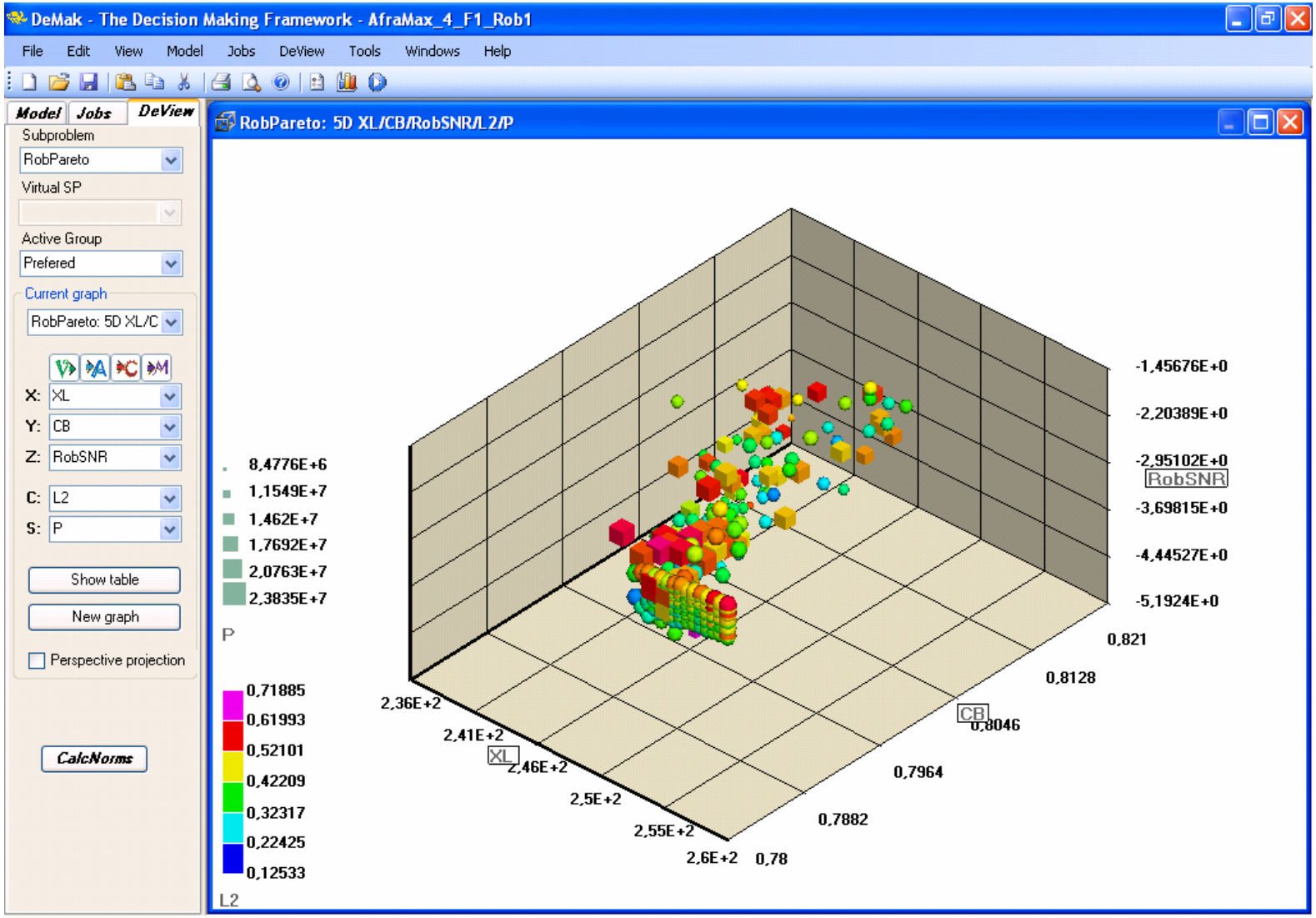

Slika 50 Nedominirani projekti Aframax tankera u *SNR* – $\sigma$ – *P* – $v_{tr}$ prostoru s $L_2$ metrikom



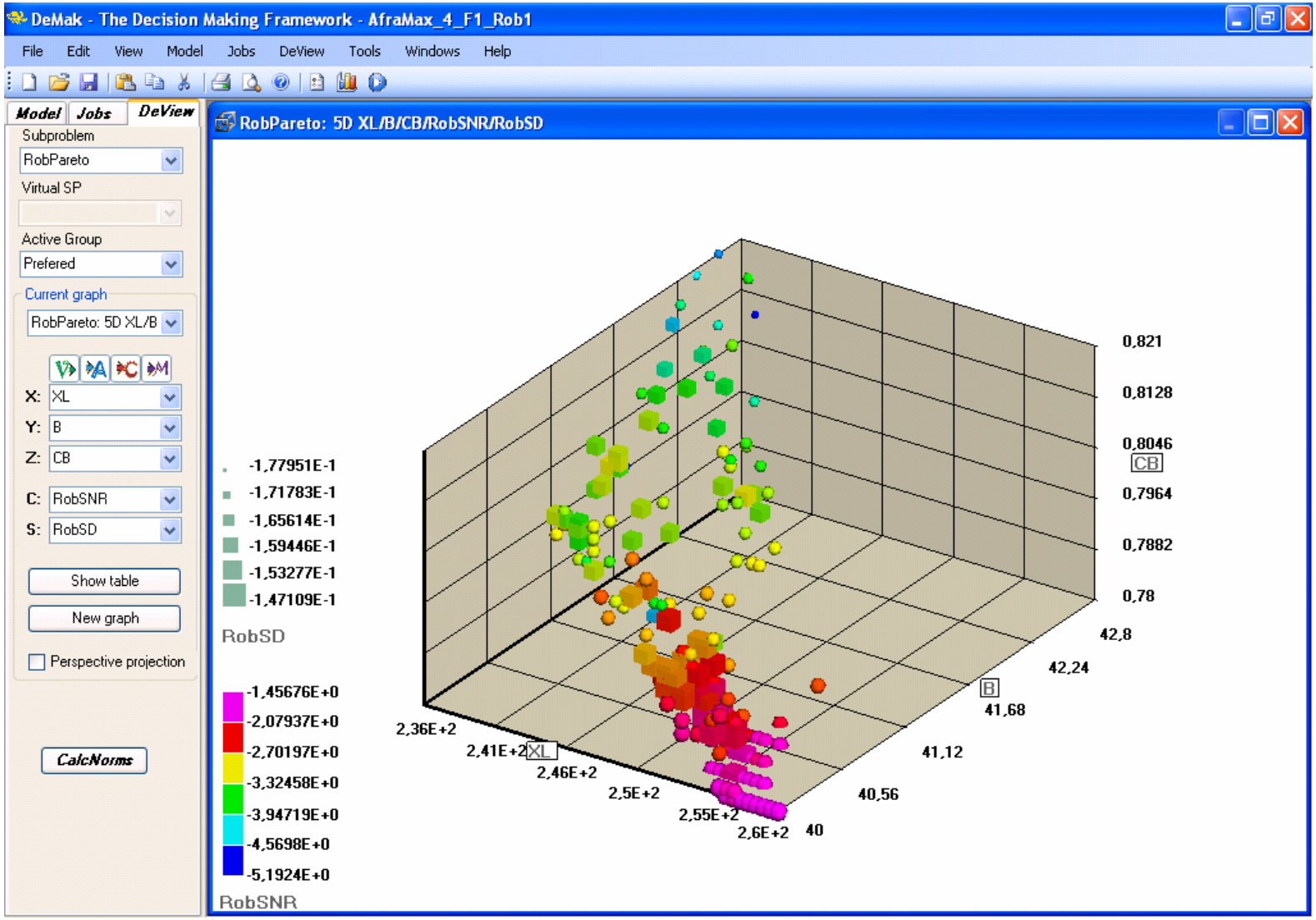

Slika 51 Nedominirani projekti Aframax tankera u $v_{tr}$ – $\sigma$ – *SNR* – *P* prostoru s $L_2$ metrikom



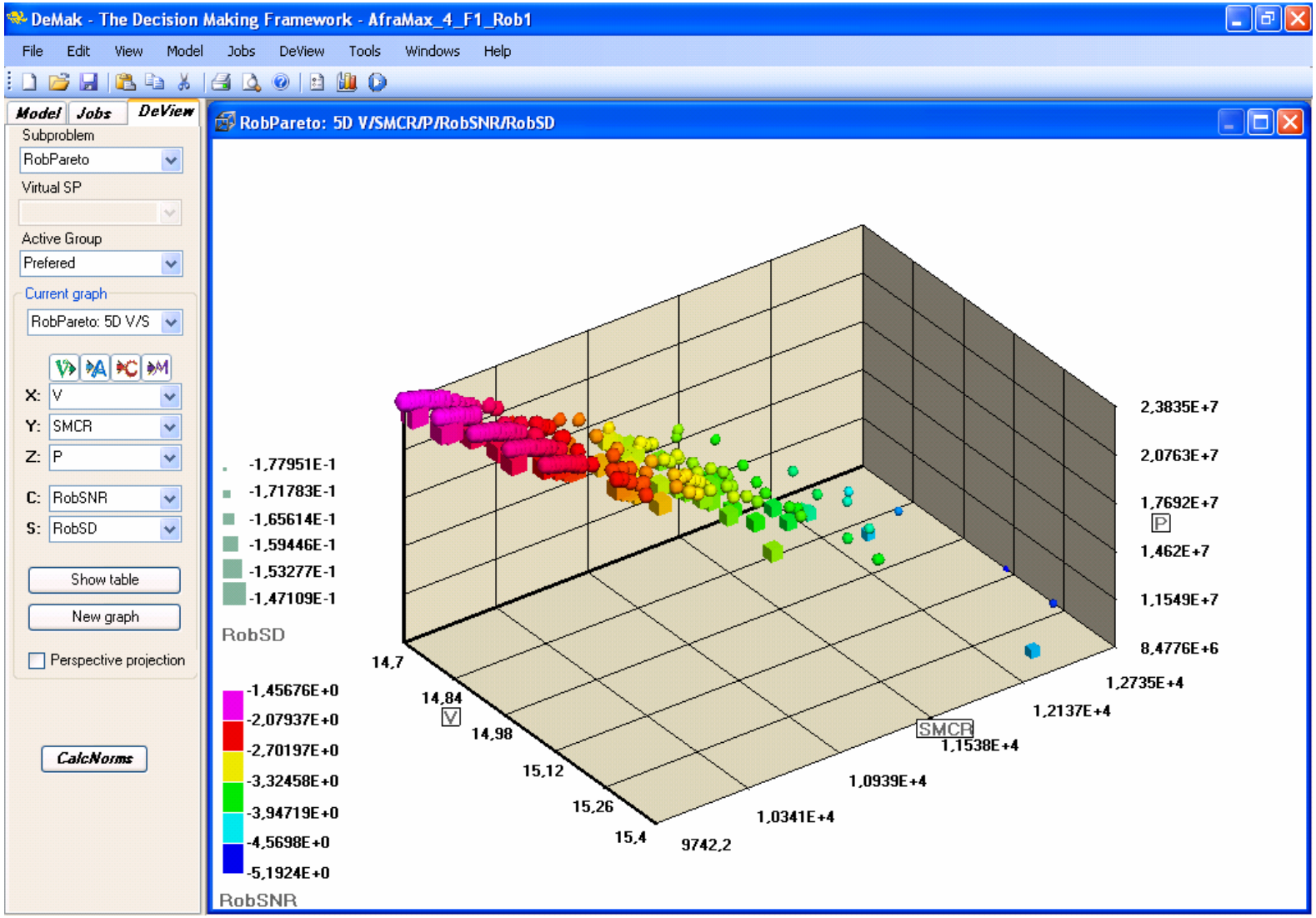

Slika 52 Nedominirani projekti Aframax tankera u $L_{pp} - \sigma - SNR - P$ prostoru s $L_2$ metrikom




Slika 53 Nedominirani projekti Aframax tankera u $L_{pp}$ – $C_B$ – $SNR$ – $P$ prostoru s $L_2$ metrikom




Slika 54 Nedominirani projekti Aframax tankera u $L_{pp} - B - C_B - SNR - \sigma$ prostoru




Slika 55 Nedominirani projekti Aframax tankera u $v_{tr}$ – *SMCR* – *P* – *SNR* – $\sigma$ prostoru

# 15 OSNIVANJE HANDYMAX BULK CARRIER-A NOVOM METODOLOGIJOM

## 15.1 Pregled suvremenih Handymax bulk carrier-a

Handymax bulk carrier-i su brodovi za prijevoz rasutih tereta veličine od 50000 do 60000 dwt. Namijenjeni su za prijevoz sipkih i komadnih tereta: žitarica, rudače, željeznih i čeličnih poluproizvoda. Izraz „handymax“ potječe od engleskog izraza „handy“ i može prevesti kao „prikladna“, „pogodna“ ili „laka za operiranje“ veličina broda. Ovaj primjer je odabran kako bi se prikazala primjenjivost nove metode i na osnivanje brodova s vrlo ograničenim mogućnostima variranja osnovnih izmjera. Primjeri suvremenih i vrlo kvalitetnih Handymax bulk carrier-a su dani u sljedećoj tablici.

| Brodogradilište | Imabari | Mitsui | Oshima | Zhejiang | Brodosplit |
|---|---|---|---|---|---|
| $L_{oa}$ (m) | 189.94 | 189.99 | 190.0 | 190.0 | 189.9 |
| $L_{pp}$ (m) | 183.0 | 182.97 | 186.0 | 183.0 | 182.0 |
| B (m) | 32.26 | 32.26 | 32.26 | 32.3 | 32.24 |
| D (m) | 17.3 | 17.9 | 18.55 | | 17.1 |
| $d_s$ (m) | | 12.55 | 13.04 | 12.5 | 12.35 |
| DW (t) | 53000 | 55641 | 60000 | 53352 | 52000 |
| GT | | 31236 | | 32474 | 29900 |
| $V_{car}$ ($m^3$) | | 70000 | | 65752 | 64935 |
| Porivni stroj | | 6S50MC-C | 6S50MC-C | 6S50MC-C | 6S50MC-C |
| MCR (kW/n) | | 9480/127 | | | 8600/121 |
| CSR (kW/n) | | | | | 7300/115 |
| $v_{trial}$ (čv) | | | | | 15.0 na $d_s$ |
| $v_{service}$ (čv) | | 14.5 | 14.5 | | 14.4 na $d_s$ |

Tablica 36 Suvremeni Handymax bulk carrier-i

Iz gornjih se podataka mogu sintezirati sljedeća zajednička svojstva:

- Ukupna nosivost se kreće od 53000 do 60000 t,
- Duljina među okomicama se kreće od 182.0 do 186.0 m,
- Širina je gotovo konstantna i kreće se od 32.24 do 32.3 m,
- Maksimalni gaz se kreće od 12.35 do 13.04 m,
- Volumen skladišta tereta je 65000 do 70000 $m^3$,
- Brzina u službi je oko 14.5 čv,
- Specifična voluminoznost broda je u području od 0.647 do 0.663.

## 15.2 Projektni zahtjev

Na osnovi gornjih podataka možemo postaviti sljedeći projektni zahtjev:

| Projektni zahtjev | Tražena vrijednost |
|---|---|
| Ukupna nosivost *DW* (t) | 55000 |
| Volumen skladišta tereta $V_{car}$ ($m^3$) | 70000 |
| Brzina na maksimalnom gazu u uvjetima pokusne plovidbe $v_{tr}$ (čv) | 14.8 |

Tablica 37 Projektni zahtjev za Handymax bulk carrier

U okviru projektnog zadatka bit će zadane gornje granice duljine između okomica, širine broda i koeficijenta punoće. Neće biti zadano ograničenje maksimalnog gaza. Ispitat će se više porivnih strojeva pogodnih za ugradnju, kao i adekvatna konfiguracija propelera. Eventualna ograničenja međusobnih odnosa osnovnih izmjera će proisteći iz postupka ekstrapolacije projektnih varijabli izvan područja suvremenih projekta, odnosno iz stava sudionika u odlučivanju.

## 15.3 Definiranje projektnog prostora

U skladu s iznesenim u Poglavljima 4 i 11, te prikazima postupka definiranja novog projektnog prostora na Slikama 4, 5, 6, 22 i 23, min-max ograničenja projektnih varijabli koje opisuju projektni prostor se mogu odrediti na nadalje izloženi način.

Definirane su sljedeće projektne varijable $\boldsymbol{x} = \boldsymbol{x}_{dsgn}$:

- duljina među okomicama $L_{pp}$,
- širina $B$,
- maksimalni gaz $d_s$,
- blok koeficijent $C_B$,
- volumen teretnog prostora $V_{car}$,
- brzina broda $v_{tr}$,
- identifikator porivnog stroja $I_{me\ i}$

Temeljem dostupnih podataka o suvremenim aframax tankera možemo očekivati da će se vlastita masa broda *LS* kretati između 10200 t do 11000 t. Obzirom da je istisnina na maksimalnom gazu definirana kao:

$$\Delta = DW + LS = 1.0273 L_{pp} B d_s C_B \text{ (t)} \tag{15.1}$$

Minimalne i maksimalne vrijednosti istisnine na maksimalnom gazu iznose:

$$65200 \leq \Delta \leq 66000 \tag{15.2}$$

Odnosno:

$$65200 \leq 1.0273 L_{pp} B d_s C_B \leq 66000 \quad (15.3)$$

Ispitivanje gornjeg uvjeta je u slučaju Handymax bulk carrier-a specifično jer se projektna rješenja mogu očekivati na gornjoj granici duljine $L_{pp}$ i širine B. Stoga se ekstrapolacija projektnog područja može provesti samo kod gaza broda $d_s$ i blok koeficijenta $C_B$, odnosno na način kako je prikazano sljedećom tablicom:

| varijabla | donja granica | gornja granica |
|---|---|---|
| $L_{pp}$ (m) | 180.0 | 183.0 |
| $B$ (m) | 32.0 | 32.24 |
| $d_s$ (m) | 12.5 | 13.5 |
| $C_B$ (-) | 0.80 | 0.86 |

Tablica 38 Početno ekstrapolirano područje osnovnih izmjera Handymax bulk carrier-a

i sa zadanim ograničenjima odnosa osnovnih izmjera:

| Odnos izmjera | donja granica | gornja granica |
|---|---|---|
| $L_{pp}/B$ | 5.4 | 5.8 |
| $L_{pp}/d_s$ | 13 | 15 |
| $B/d_s$ | 2.3 | 2.6 |

Tablica 39 Ograničenja odnosa osnovnih izmjera Handymax bulk carrier-a

Dovodi do sljedećeg područja koje ispunjava zadana ograničenja:

| varijabla | donja granica | gornja granica |
|---|---|---|
| $L_{pp}$ (m) | 180.0 | 183.0 |
| $B$ (m) | 32.0 | 32.24 |
| $d_s$ (m) | 12.6 | 13.4 |
| $C_B$ (-) | 0.804 | 0.855 |
| $V_{car}$ ($m^3$) | 69700 | 70300 |
| $v_{tr}$ (čv) | 14.5 | 15.1 |

Tablica 40 Novo projektno područje osnovnih izmjera Handymax bulk carrier-a

Kod selekcije porivnog stroja promotrimo strojeve iz sljedeće tablice:

| Porivni stroj | 6S50MC-C7 | 7S50MC-C7 |
|---|---|---|
| *MCR* (kW) | 9480 | 11060 |
| Okretaji/min | 127 | 127 |
| Masa stroja (t) | 212 | 238 |
| Duljina stroja (mm) | 6774 | 7624 |
| Relativna cijena | 100 | 115 |

Tablica 41 Porivni strojevi za moguću ugradnju u Handymax bulk carrier

Šesterocilindarski porivni stroj 6S50MC-C ima odgovarajuću snagu i broj okretaja za postizanje zahtijevane brzine broda. Odabran je za porivni stroj kod najvećeg broja suvremenih handymax bulk carrier-a. Vibracijski je pogodniji sedmerocilindarskog stroja. Jeftiniji je i kraći te posljedično vodi kraćoj strojarnici i većoj iskoristivosti ukupnog volumena broda, odnosno većoj specifičnoj voluminoznosti broda κ.

Sedmerocilindarski porivni stroj 7S50MC-C ima veću maksimalnu snagu od potrebne, pa se može deratirati selektiranjem nižeg maksimalnog broja okretaja s odgovarajućom nižom maksimalnom snagom. Snižavanje selektiranog broja okretaja na cca 100 ($min^{-1}$) vodi promjeru optimalnog četverokrilnog propelera od preko 6 metara, što izaziva ozbiljne poteškoće kod smještaja propelera. Kako se maksimalni ugradivi promjer propelera $D_{prop\ max}$ može procijeniti na oko 6.0 m, alternativno rješenje je podoptimalni četverokrilni propeler promjera ograničenog na maksimalno ugradivi ili propeler s pet ili šest krila. Stroj je teži 26 tona od šesterocilindarskog te 15-tak posto skuplji. Ovaj stroj se može uzeti u razmatranje ukoliko se njegovim odabirom postiže viši ukupni propulzijski stupanj djelovanja.

Temeljem iznesenog može se definirati novi projektni prostor koji je prikazan sljedećom tablicom.

| varijabla | donja granica | gornja granica |
|---|---|---|
| $L_{pp}$ (m) | 180.0 | 183.0 |
| $B$ (m) | 32.0 | 32.24 |
| $d_s$ (m) | 12.6 | 13.4 |
| $C_B$ (-) | 0.804 | 0.855 |
| $V_{car}$ ($m^3$) | 69700 | 70300 |
| $v_{tr}$ (čv) | 14.5 | 15.1 |
| $I_{me\ i}$ (-) | 1 (6S50MC-C7) | 2 (7S50MC-C7) |

Tablica 42 Novi projektni prostor Handymax bulk carrier-a

## 15.4 Identifikacija projektnog zadatka

### 15.4.1 Projektne varijable $\boldsymbol{x} = \boldsymbol{x}_{dsgn}$

Sljedeće projektne varijable $\boldsymbol{x}_{dsgn} = \{L_{pp}, B, d_s, C_B, V_{car}, v_{tr}, I_{me}\}$ su identificirane:

- duljina među okomicama $L_{pp}$,
- širina $B$,
- maksimalni gaz $d_s$,
- blok koeficijent $C_B$,
- volumen teretnog prostora $V_{car}$,
- brzina broda $v_{tr}$,
- identifikator porivnog stroja $I_{me\ i}$.

### 15.4.2 Projektni parametri $\boldsymbol{d} = \{\boldsymbol{d}_{dsgn}, \boldsymbol{d}_{exp}\}$

Projektni parametri se sastoje od dvaju velikih cjelina: parametara koji proistječu iz projekta i gradnje broda $\boldsymbol{d}_{dsgn}$ te parametara koji proistječu iz eksploatacije broda $\boldsymbol{d}_{exp}$. Parametri koji proistječu iz projekta i gradnje broda su prikazani sljedećom tablicom:

| Projektni parametar | Zadana vrijednost |
|---|---|
| Zahtijevana ukupna nosivost $DW_{req}$ (t) | 55000 |
| Zahtijevani vol. teret. prostora $V_{car\ req}$ ($m^3$) | 70000 |
| Zahtijevana brzina $v_{tr\ req}$ (čv) | 14.8 |
| „Specifična voluminoznost broda“ $\kappa$ (-) | 0.640-0.663 |
| Utjecaj čelika povišene čvrstoće $f_1$ (%) | 3.0 |
| Maksimalna snaga porivnog stroja 1 $MCR_1$ (kW) | 9480 |
| Cijena porivnog stroja 1 $C_{me\ 1}$ (€) | 3100000 |
| Maksimalna snaga porivnog stroja 2 $MCR_2$ (kW) | 11060 |
| Cijena porivnog stroja 2 $C_{me\ 2}$ (€) | 3600000 |
| Jedinična cijena čelika $c_{st}$ (US$/t) | 700 |
| Odnos bruto/neto mase čelika $c_{gwst}$ (-) | 1.14 |
| Cijena preostalog materijala i opreme $C_{res}$ (€) | 5000000 |
| Proizvodnost $P_{cGT}$ (rs/cGT) | 25.0 |
| Jedinična satnica $v_{lab}$ (€/rs) | 18.0 |
| Preostali fiksni troškovi $C_{pt}$ (€) | 480000 |
| Udio preostalih varijabilnih troškova $c_{var}$ (%) | 8 |
| Odnos €/US$ $ER$ (-) | 1.35 |

Tablica 43 Projektni parametri $\boldsymbol{d}_{dsgn}$ proizašli iz projekta i gradnje Handymax bulk carrier-a

U ovom je primjeru „specifična voluminoznost broda“ $\kappa$ zadana kao funkcija blok koeficijenta $C_B$. Projektima s nižim blok koeficijentom su pridružene niže vrijednosti

„specifične voluminoznosti“, jer imaju kraći paralelni srednjak i slijedom toga, manji volumen teretnog prostora za iste iznose *Lpp-a*, *B* i *D*. Utjecaj izbora porivnog stroja (sedmerocilindarski stroj vodi produljenju strojarnice za oko 800 mm, odnosno jedno građevno rebro) se, u ovoj fazi razrade projekta, može zanemariti, jer se zbog toga izgubi svega oko 250 $m^3$ teretnog prostora, što je manje od 0.4% ukupnog volumena skladišta tereta.

Druga velika grupa su parametri koji proistječu iz eksploatacije broda i prikazani su sljedećom tablicom:

| Projektni parametar | Zadana vrijednost |
|---|---|
| Cijena „standardne“ novogradnje $C_{nb\text{-}stand}$ (US$) | 30000000 |
| Rok eksploatacije broda $T_{exp}$ (god) | 12.0 |
| Stopa deprecijacije broda *DEP* (%) | 5.0 |
| Godišnja stopa inflacije *INF* (%) | 2.0 |
| Spec. potrošnja poriv. stroja *SFOC* (t/kWh) | 0.00017 |
| Jedinična cijena goriva $c_{fuel}$ (US$/t) | 470 |
| Dnevni prihod od eksploatacije $R_{day}$ (US$) | 24000 |
| Vrijeme broda van najma $O_{year}$ (dan/god) | 5 |
| Trošak posade $C_{crew}$ (US$) | 980000 |
| Trošak zaliha i maziva $C_{stor}$ (US$) | 85000 |
| Trošak tekućeg održavanja $C_{main}$ (US$) | 105000 |
| Trošak osiguranja $C_{ins}$ (US$) | 80000 |
| Opći troškovi $C_{gen}$ (US$) | 100000 |
| Trošak periodičnog održavanja $C_{dock}$ (US$) | 80000 |
| Trošak lučkih pristojbi $C_{port}$ (US$) | 70000 |
| Trošak remorkera i pilota $C_{tug}$ (US$) | 30000 |
| Trošak kanala i plovnih putova $C_{can}$ (US$) | 20000 |
| Trošak ukrcaja tereta $C_{load}$ (US$) | 40000 |
| Trošak iskrcaja tereta $C_{un}$ (US$) | 35000 |
| Trošak oštećenja tereta $C_{claim}$ (US$) | 25000 |
| Vrijeme plovidbe s teretom $T_{car}$ (dan/god) | 140 |
| Vrijeme plovidbe u balastu $T_{ball}$ (dan/god) | 140 |
| Vrijeme na ukrcaju tereta $T_{load}$ (dan/god) | 40 |
| Vrijeme na iskrcaju tereta $T_{un}$ (dan/god) | 40 |
| Potrošnja pom. stroj. - plovidba/teret $FOCC_{aux}$ (t/dan) | 2.0 |
| Potrošnja pom. stroj. - plovidba/balast $FOCB_{aux}$ (t/dan) | 2.0 |
| Potrošnja pom. stroj. - luka/ukrcaj $FOCL_{aux}$ (t/dan) | 2.5 |
| Potrošnja pom. stroj. - luka/iskrcaj $FOCU_{aux}$ (t/dan) | 5.0 |
| Faktor smanjenja potrošnje u balastu $f_{ball}$ (%) | 10.0 |
| Godišnja kamata i/ili dividenda *INT* (%) | 5.0 |
| Jedinična cijena otpadnog čelika (US$/t) | 400 |

Tablica 44 Projektni parametri $\boldsymbol{d}_{exp}$ proizašli iz eksploatacije Handymax bulk carrier-a

### 15.4.3 Projektna ograničenja $\boldsymbol{g} = \boldsymbol{g}_{dsgn}$

Projektna ograničenja su definirana u Poglavlju 15.3. Nadalje će biti kratko rekapitulirana. Projektna ograničenja izražena minimalnim i maksimalnim vrijednostima projektnih varijabli $\boldsymbol{g}_{min\text{-}max}$ su identična granicama novog projektnog prostora iz Tablice 42, odnosno:

| varijabla | donja granica | gornja granica |
|---|---|---|
| $L_{pp}$ (m) | 180.0 | 183.0 |
| $B$ (m) | 32.0 | 32.24 |
| $d_s$ (m) | 12.6 | 13.4 |
| $C_B$ (-) | 0.804 | 0.855 |
| $V_{car}$ ($m^3$) | 69700 | 70300 |
| $v_{tr}$ (čv) | 14.5 | 15.1 |

Tablica 45 Ograničenja projektnih varijabli $\boldsymbol{g}_{min\text{-}max}$ Handymax carrier-a

Drugu skupinu ograničenja čine ograničenja međusobnih odnosa pojedinih varijabli $\boldsymbol{g}_{ratios}$ i definiraju se sukladno projektantovim subjektivnim stavovima i iskustvu. Prva tri ograničenja međusobnih odnosa varijabli ($L_{pp}/B$, $L_{pp}/d_s$ i $B/d_s$) su prethodno zadana ograničenjima odnosa osnovnih izmjera iz Tablice 39 prilikom definiranja novog projektnog prostora. Ograničenja slijede preporuke iz [16,17] uz uvažavanje specifičnosti projektnog prostora koji je razapet projektnim varijablama.

| odnos varijabli | donja granica | gornja granica |
|---|---|---|
| $L_{pp}/B$ | 5.4 | 5.8 |
| $L_{pp}/d_s$ | 13 | 15 |
| $B/d_s$ | 2.3 | 2.6 |
| $L_{pp}/D$ | 9.8 | 10.8 |

Tablica 46 Ograničenja odnosa projektnih varijabli $\boldsymbol{g}_{ratios}$ Handymax bulk carrier-a

### 15.4.4 Projektni atributi $\boldsymbol{y(x,d)} = \{\boldsymbol{y}_{dsgn}, \boldsymbol{y}_{exp}\}$

Projektni atributi su prethodno opisani u Poglavljima 8, 10 i 11. N-torka atributa se sastoji od n-torke atributa proisteklih iz projekta i gradnje broda $\boldsymbol{y}_{dsgn} = \{DW_{ach}, V_{car\ ach}, v_{tr\ ach}, W_{st}, CSR, C_{mat}, C_{lab}, C_{nb}\}$ i atributa $P$ proisteklog iz eksploatacije broda. Nadalje su, zbog preglednosti, samo rekapitulirani:

- Postignuta ukupna nosivost $DW_{ach}$ (t),
- Postignuti volumen teretnog prostora $V_{car\ ach}$ ($m^3$),
- Postignuta brzina $v_{tr\ ach}$ (čv),
- Masa čelične konstrukcije $W_{st}$ (t),
- Snaga porivnog stroja *CSR* (kW),
- Cijena materijala $C_{mat}$ (US$),
- Cijena rada (procesa) $C_{lab}$ (US$),
- Cijena novogradnje $C_{nb}$ (US$),
- Profit broda *P* (US$).

U skladu s iznesenim u Poglavlju 12.2.1 i 12.2.2 preferencije unutar svakog pojedinog projektnog atributa se zadaju pomoću neizrazitih funkcija. Atributima pridružujemo neizrazite funkcije kojima zadajemo područje „mekog“ ispunjavanja ciljanih vrijednosti. Ponovno se, kao i u prethodnom primjeru, pojavljuje kao izuzetak atribut snage porivnog stroja koji je direktno vezan za atribut profita broda, pa mu stoga ne pridružujemo neizrazitu funkciju, niti ga tretiramo prilikom određivanja subjektivnih relativnih preferencija među atributima.

I u ovom primjeru vrijede stavovi izneseni u stavci 14.4.4 o pridruživanju pripadnih tipova neizrazitih funkcija pojedinim atributima. Slijedom toga, atributima koji su predmet ugovornih obaveza (*DW*, $V_{car}$, $v_{tr}$) ćemo pridružiti "Ω" oblik neizrazite funkcije, atributima koji proizlaze iz projekta i gradnje broda ($W_{st}$, $C_{mat}$, $C_{lab}$ i $C_{nb}$) ćemo pridružiti "Z" oblik, a atributu profita broda P "S" oblik neizrazite funkcije.

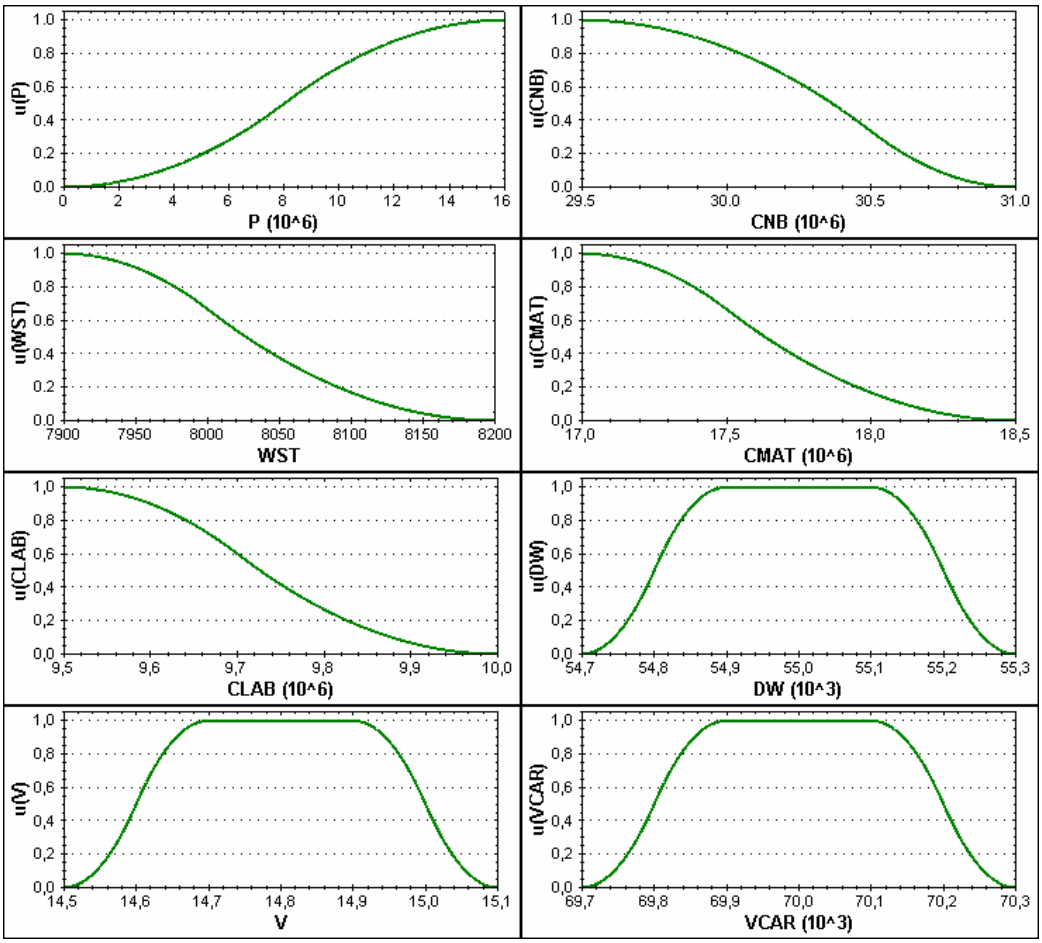
Sljedećom tablicom su prikazane neizrazite funkcije koje su pridružene svakom pojedinom projektnom atributu.

| Atribut | Tip funkcije | $a_1$ | $b_1$ | $c_1$ | $c_2$ | $b_2$ | $a_2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *DW* (t) | Ω | 54700 | 54800 | 54900 | 55100 | 55200 | 55300 |
| $V_{car}$ ($m^3$) | Ω | 69700 | 69800 | 69900 | 70100 | 70200 | 70300 |
| $v_{tr}$ (čv) | Ω | 14.5 | 14.6 | 14.7 | 14.9 | 15.0 | 15.1 |
| $W_{st}$ (t) | Z | | | | 7900 | 8000 | 8200 |
| $C_{mat}$ (mUS$) | Z | | | | 17.0 | 17.5 | 18.5 |
| $C_{lab}$ (mUS$) | Z | | | | 9.5 | 9.7 | 10.0 |
| $C_{nb}$ (mUS$) | Z | | | | 29.5 | 30.5 | 31.0 |
| *P* (mUS$) | S | 0 | 8.0 | 16.0 | | | |

Tablica 47 Neizrazite funkcije pridružene pojedinim atributima Handymax bulk carrier-a

I u ovom primjeru unutar-atributne preferencije su zadane neizrazitim funkcijama koje su za ukupnu nosivost *DW*, volumen teretnog prostora $V_{car}$ i brzinu broda $v_{tr}$ „Ω“ oblika, za masu čelične konstrukcije $W_{st}$, cijenu materijala $C_{mat}$, cijenu rada $C_{lab}$ i cijenu

novogradnje $C_{nb}$ „Z“ oblika, a za profit broda $P$ „S“ oblika. Narednom slikom su grafički prikazane preferencije unutar pojedinih projektnih atributa.



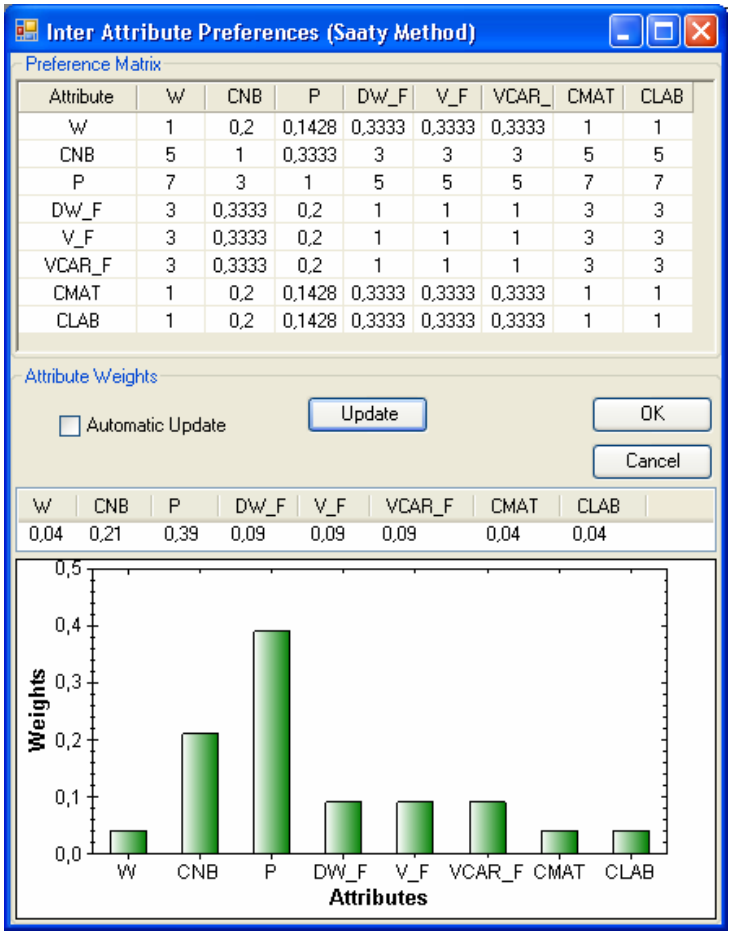

Slika 56 Grafički prikaz neizrazitih funkcija kod osnivanja Handymax bulk carrier-a

Nakon što su zadane preferencija unutar svakog pojedinog atributa, slijedi određivanje subjektivnih relativnih preferencija među atributima. I u ovom slučaju također vrijedi komentar iz Poglavlja 14, pa su subjektivne relativne preferencije među atributima zadane na način da se respektira jedno od osnovnih načela nove metodologije: u procesu odlučivanja sudjeluju projektant, menadžment brodogradilišta i menadžment pomorske kompanije. Zbog toga je profit broda $P$ najjače preferiran, nakon toga je preferirana cijena novogradnje $C_{nb}$, pa atributi koji su ujedno projektni zahtjevi i garantirane karakteristike broda (ukupna nosivost $DW$, volumen teretnih tankova $V_{car}$ i brzina broda $v_{tr}$. Najslabije su preferirani atributi koji mogu biti zanimljivi isključivo brodogradilištu i to samo u određenim situacijama, dok pomorskoj kompaniji nisu od značaja.

U skladu s primijenjenom optimizacijskom metodom višeatributnog odlučivanja opisanom u Poglavlju 12.2.2 i sukladno zadanim preferencijama u prethodnom primjeru, zadana je sljedeća matrica subjektivnih relativnih preferencija između pojedinih atributa.

| | $W_{st}$ | $C_{mat}$ | $C_{lab}$ | $DW$ | $V_{car}$ | $v_{tr}$ | $C_{nb}$ | $P$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $W_{st}$ | 1 | 1 | 1 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1/5 | 1/7 |
| $C_{mat}$ | 1 | 1 | 1 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1/5 | 1/7 |
| $C_{lab}$ | 1 | 1 | 1 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1/5 | 1/7 |
| $DW$ | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1/3 | 1/5 |
| $V_{car}$ | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1/3 | 1/5 |
| $v_{tr}$ | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1/3 | 1/5 |
| $C_{nb}$ | 5 | 5 | 5 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1/3 |
| $P$ | 7 | 7 | 7 | 5 | 5 | 5 | 3 | 1 |

Tablica 48 Zadane preferencije među atributima Handymax bulk carrier-a




Slika 57 Grafički prikaz međuatributnih preferencija kod osnivanja Handymax bulk carrier-a

### 15.4.5 Projektni ciljevi $\boldsymbol{o} = \{\boldsymbol{o}_{dsgn}, \boldsymbol{o}_{exp}\}$

Projektni ciljevi su prethodno opisani u Poglavljima 8, 10 i 11. Nadalje su, zbog preglednosti, samo rekapitulirani. Projektni ciljevi su:

- Minimiziranje snage porivnog stroja,
- Minimiziranje mase čelične konstrukcije,
- Minimiziranje cijene ugrađenog čelika,
- Minimiziranje cijene rada (procesa),
- Minimiziranje cijene koštanja broda,
- Maksimiziranje profita broda.

## 15.5 Variranje projektnih varijabli

Projektne varijable: duljina između okomica $L_{pp}$, širina B, maksimalni gaz $d_s$ i koeficijent punoće $C_B$ se variraju zadanim koracima između pripadnih minimalnih i maksimalnih vrijednosti. Prilikom zadavanja koraka treba obratiti pažnju da njihova veličina bude u razumnim okvirima. Grubi (veliki) korak pojednostavnjuje provođenje postupka optimizacije, ali povećava opasnost da se ne pronađe globalni optimum. Obrnuto, sitan korak komplicira provođenje postupka optimizacije, a pored toga ne vodi projektnim rješenjima koja su u praksi izvediva.

Temeljem iznesenih stavova određeni su sljedeći koraci:

| varijabla | donja granica | korak | gornja granica |
|---|---|---|---|
| $L_{pp}$ (m) | 180.0 | 1.0 | 183.0 |
| $B$ (m) | 32.0 | 0.24 | 32.24 |
| $d_s$ (m) | 12.6 | 0.1 | 13.4 |
| $C_B$ (-) | 0.804 | 0.0001 | 0.855 |
| $V_{car}$ ($m^3$) | 69700 | 10 | 70300 |
| $v_{tr}$ (čv) | 14.5 | 0.05 | 15.1 |

Tablica 49 Zadani koraci pojedinih atributa Handymax bulk carrier-a

## 15.6 Približni proračun minimalnog snage nadvođa

Približni proračun minimalnog nadvođa je izrađen za pretpostavljenu konfiguraciju broda s pramčanim kaštelom, palubnim skokom isključivo zbog preluka glavne palube te s računskom duljinom broda većom za 0.5 m od duljine među okomicama (Prilog 3).

## 15.7 Proračun minimalne snage porivnog stroja

U svrhu izrade aproksimativnih izraza za trajne snage u službi porivnih strojeva koji su pogodni za ugradnju na brod, a unutar prethodno navedenih granica projektnog područja su izrađene baze podataka.

Baze podataka su izrađene na temelju rezultata SEAKING-ovog proračuna za kočene snage odabranih porivnog stroja, a zatim korelirane 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 baze podataka su korišteni rezultati 50 modela brodova s po 3 različite brzine unutar sljedećeg područja i odgovarajućih okretaja vijka od 105 do 127 ($min^{-1}$) za šesterocilindarski porivni stroj, odnosno 100 do 120 ($min^{-1}$) za sedmerocilindarski porivni stroj.

| varijabla | donja granica | gornja granica |
|---|---|---|
| $\Delta$ (t) | 65200 | 66000 |
| $v_{tr}$ (čv) | 14.5 | 15.1 |
| $L_{pp}$ (m) | 180.0 | 183.0 |
| $B$ (m) | 32.0 | 32.24 |
| $d_s$ (m) | 12.6 | 13.4 |
| $C_B$ (-) | 0.805 | 0.855 |

Tablica 50 Granice baze podataka Handymax bulk carrier-a

Rezultat regresijske analize [54] je dao sljedeću aproksimaciju za trajnu snagu porivnog stroja 6S50MC-C7 u uvjetima pokusne plovidbe i na maksimalnom gazu (Prilog 4):

$$CSR = 0.0086275 L_{pp}^{-0.35239} B^{1.2623} d_s^{0.41769} C_B^{4.2918} v_{tr}^{4.0881} \left(1 - 0.010975 \frac{L_{pp}}{d_s}\right) \text{(kW)} \tag{15.4}$$

U svrhu zadavanja izraza za trajnu snagu porivnog stroja 7S50MC-C7 u uvjetima pokusne plovidbe i na maksimalnom gazu izvršena je analiza efikasnosti propulzijskog sustava s sljedećim propelerima:

- četverokrilni propeler,
- peterokrilni propeler,
- šesterokrilni propeler.

Analiza je provedena na temelju rezultata ispitivanja prototipnog broda s četverokrilnim propelerom, a sljedećih osnovnih karakteristika:

$L_{pp}$ = 182.0 (m)
$B$ = 32.24 (m)
$d_s$ = 12.35 (m)
$C_B$ = 0.8352
Porivni stroj 6S50MC-C7
$CSR$ = 7300 (kW) / 124 ($min^{-1}$)
$v_{tr}$ = 14.97 (čv)

Promjer svih propelera je ograničen na maksimalni promjer od $D_{prop\ max}$ = 6.0 m, dok su okretaji su bili zadani prema raspoloživoj snazi porivnog stroja $CSR$ pri okretajima kod kojih je dosegnuta ostvarena brzina prototipnog broda. Rezultat analize [55] je pokazao da je četverokrilni propeler bio efikasniji od prototipa za oko 1.1 %, šesterokrilni propeler za oko 1.5 %, a peterokrilni propeler za oko 2.1 %. Zbog toga je za daljnju razradu matematičkog modela porivnog stroja 7S50MC-C7 odabran peterokrilni propeler s sljedećom aproksimacijom snage:

$$CSR = 0.0084483 L_{pp}^{\ -0.35239} B^{1.2623} d_s^{\ 0.41769} C_B^{\ 4.2918} v_{tr}^{\ 4.0881} \left(1 - 0.010975 \frac{L_{pp}}{d_s}\right) \text{ (kW)} \tag{15.5}$$

## 15.8 Proračun mase čelične konstrukcije, mase strojo opreme i mase ostale brodske opreme

Proračun sastavnih elemenata vlastite mase broda se računaju na temelju izraza iz Poglavlja 7.5.

1) Masa čelične konstrukcije

$$W_{st} = \left(1 - \frac{3}{100}\right) \left\langle 0.0305 \left[L_{pp}\left(B + 0.85D + 0.15 d_s\right)\right]^{1.36} \left\{1 + \frac{1}{2}\left[\left(C_B - 0.7\right) + \frac{\left(1 - C_B\right)\left(0.8D - d_s\right)}{3 d_s}\right]\right\} + 450 \right\rangle \text{ (t)} \tag{15.6}$$

2) Masa strojo opreme

U slučaju porivnog stroja 6S50MC-C7:

$$W_m = SMCR \frac{680 - 0.0034 SMCR}{7350} \text{ (t)} \tag{15.7}$$

U slučaju porivnog stroja 6S50MC-C7:

$$W_m = SMCR\frac{740 - 0.0034SMCR}{7350} \text{ (t)} \tag{15.8}$$

gdje je:

$$SMCR = \frac{CSR}{0.9} \qquad \text{maksimalna selektirana snaga porivnog stroja (kW)} \tag{15.9}$$

3) Masa opreme

$$W_o = \left(0.34 - \frac{L_{pp}}{1620}\right)L_{pp}B + 400 \text{ (t)} \tag{15.10}$$

15.9 Proračun ukupnog zatvorenog volumena broda

Za izračun cijene rada (procesa) u skladu s proračunom iz poglavlja 7.6.2, potrebno je odrediti ukupni zatvoreni volumen broda *V*, koji je definiran ga na sljedeći način:

$$V = V_D + V_{cam} + V_{\sup} + V_{for} \text{ (m}^3\text{)} \tag{15.11}$$

gdje su:

$V_D$ - volumen trupa broda do visine na boku (m$^3$)
$V_{cam}$ - volumen preluka (m$^3$)
$V_{sup}$ - volumen nadgrađa, konstrukcije ispod dimnjaka, grotala i poklopaca (m$^3$)
$V_{for}$ - volumen kaštela (m$^3$)

Volumen trupa broda do visine na boku je definiran kao:

$$V_D = L_{pp}BDC_{BD} \text{ (m}^3\text{)} \tag{15.12}$$

Koeficijent punoće na punoj visini broda na boku $C_{BD}$ je u ovom slučaju definiran sljedećom aproksimacijom (prema svojstvima slične brodske forme):

$$C_{BD} = C_B\left[1 + 0.00837\left(D - d_s\right)\right] \tag{15.13}$$

Volumeni preluka, nadgrađa (s grotlima i poklopcima) i kaštela se mogu procijeniti na:

$V_{cam}$ = 1500 (m$^3$)
$V_{sup}$ = 7800 (m$^3$)
$V_{for}$ = 700 (m$^3$)

## 15.10 Prikaz i diskusija rezultata

Provedeni optimizacijski postupak je generirao Pareto frontu projektnih rješenja. Kao i u prethodnom primjeru, na narednim slikama su prikazani nedominirani projekti u različitim višedimenzionalnim koordinatnim sustavima.

Na Slikama 58, 59 i 60 koordinatni sustav je zadan kao i prethodnom primjeru: atributi mase čelične konstrukcije $W_{st}$, cijene novogradnje $C_{nb}$ i profita broda $P$ su na pojedinim koordinatama. Oblikom oznake pojedinog projekta (kocka ili kugla) su označeni pripadni porivni strojevi (projekti označeni kockom imaju veći porivni stroj 7S50MC-C7, a kuglom manji porivni stroj 6S50MC-C7). Veličina kocke, odnosno kugle predstavlja atribut postignute brzine broda $v_{tr}$ (manja kocka, odnosno kugla predstavljaju nižu postignutu brzinu). Spektrom boja je prikazana udaljenost od utopije prema odabranoj metrici (hladni plavi dio spektra predstavlja manju udaljenost, a topli crveni dio spektra veću udaljenost). Ideal (utopija) je prikazan velikom kuglom roza boje na lijevom gornjem kraju koordinatnog prostora (minimalna masa čelične konstrukcije $W_{st}$ i cijena novogradnje $C_{nb}$ uz maksimalni profita broda $P$. Selektirani (preferirani) projekti su označeni trodimenzionalnim križevima.

Na Slici 58 je odabrana $L_1$ metrika. Može se uočiti da su projekti podijeljeni u dvije udaljene skupine, jednu s manjim porivnim strojem, a drugu s većim porivnim strojem. To znači da razlika u cijeni porivnog stroja od 0.5 milijuna € nije nadoknadiva nikakvim mogućim uštedama u materijalu, radu ili preostalim troškovima novogradnje. I u ovom primjeru se, kao i u prethodnom, može uočiti da je prevladavajući broj nedominiranih projekata blizu utopije, odnosno da je najveći broj projekata označen modrom, plavom i zelenom bojom. Ponovno se dade zaključiti da $L_1$ metrika ne pravi velike razlike među pretežnim brojem nedominiranih projekata, pa stoga nije pogodna za kvalitetno odlučivanje prilikom selektiranja preferiranih projekata.

Slikom 59 je prikazan isti projektni prostor kao i prethodnom slikom, osim što je odabrana $L_\infty$ metrika. I u ovom se slučaju ponavlja slična situacija kao na prethodnoj slici. Ponovno se može zaključiti da ni $L_\infty$ metrika ne razlučuje dovoljno precizno nedominirane projekte, te da stoga nije pogodna za kvalitetno selektiranje preferiranih projekata.

Slika 60 prikazuje isti projektni prostor, ali ovog puta s $L_2$ metrikom. $L_2$ metrika je i u ovom primjeru postigla bolju razlučivost kvalitete projekta. Dobivena slika nedominiranih projekata omogućuje preciznije razaznavanje pojedinih projekata. Na slici se može uočiti da su projekti s manjim porivnim strojem generalno bliži utopiji. Također se može zaključiti da dominantan broj projekata iz obje skupine ima ostvaren visoki profit $P$. Atribut mase čelične konstrukcije varira vrlo diskretno (u okviru 90-tak tona), što je bilo za očekivati jer je duljina broda $L_{pp}$ definirana vrlo uskim min-max ograničenjem, a upravo duljina broda dominantno utječe na masu čelične konstrukcije.

Projektni prostor je ograničen obzirom na brzinu broda na projekte s ostvarenom brzinom od 14.5 čv do 15.0 čv, što je dosta široko područje, pa je stoga zanimljivo promotriti utjecaj brzine broda $v_{tr}$ na realizirani profit $P$. Slika 61 prikazuje koordinatni

sustav s brzinom $v_{tr}$, cijenom novogradnje $C_{nb}$ i profitom broda $P$ na koordinatnim osima. Veličina kocke, odnosno kugle predstavlja selektiranu maksimalnu snagu porivnog stroja *SMCR* (manja kocka, odnosno kugla predstavljaju manju snagu). Odabrana metrika $L_2$ je predstavljena spektrom (kao i na Slici 60). I u ovom je slučaju ovakav prikaz olakšao odabir preferiranih projekata. Može se uočiti da snaga porivnog stroja *SMCR* raste od nižih brzina prema višima, te da ima bitno više novogradnji s većim porivnim strojem kod najviših ostvarenih brzina. Iz prvog zapažanja se može zaključiti da se dogodilo ono što je očekivano, odnosno da porast brzine uzrokuje eksponencijalni porast snage porivnog stroja. Druga opservacija vodi zaključku da kod viših brzina manji porivni stroj ne može razviti traženu snagu.

Preferirani projekti su selektirani na sljedeći način: odabrana su dva projekta s apsolutno najvećim ostvarenim profitima $P$ (jedan u kategoriji projekata s manjim, a drugi u kategoriji s većim porivnim strojem), dva su projekta selektirana prema najnižoj cijeni novogradnje $C_{nb}$ (ponovno jedan s manjim i jedan s većim porivnim strojem), izabrana su dva projekta s najvećim profitima $P$ uz uvjet ostvarene zahtijevane brzine $v_{tr}$ od 14.8 čv (po jedan s manjim i većim porivnim strojem) te naposljetku dva projekta koji su najbliži utopiji, jedan prema $L_1$ i $L_2$ metrikama, a drugi prema $L_\infty$ metrici.

Preferirani projekti su prikazani na Slici 62. Koordinatni sustav, veličina oznaka i boja su jednako zadani kao na Slici 60, pa se stoga može reći da je Slika 62 ista kao Slika 60, ali bez nepreferiranih projekata. Preferirani projekti su projicirani na sve tri koordinatne ravnine, pa se lako mogu uočiti realizirane vrijednosti tih atributa. Svih osam odabranih projekata ima profit pri vrhu realiziranih profita svih nedominiranih projekata. Udaljenost od utopije varira.

Slika 63 služi za analizu utjecaja osnovnih projektnih varijabli $L_{pp}$, $B$, $d_s$ i $C_B$ na oblik i smještaj Pareto fronte. Koordinatni sustav je zadan varijablama duljine među okomicama $L_{pp}$, širine $B$ i maksimalnog gaza $d_s$. Oblikom oznake pojedinog projekta (kocka ili kugla) su, kao i u prethodnim slučajevima, označeni pripadni porivni strojevi. Veličina kocke, odnosno kugle predstavlja blok koeficijent $C_B$ (manja kocka, odnosno kugla predstavljaju manji blok koeficijent). Spektrom boja je prikazana udaljenost od utopije prema $L_2$ metrici. Može se ustanoviti da se najveći broj nedominiranih projekata smjestio u području visokog gaza i niskog blok koeficijenta. Takva situacija je očekivana jer je atribut profita $P$ zadan kao dominantan, što ima za posljedicu minimiziranje angažirane snage porivnog stroja *CSR* (odnosno selektirane maksimalne snage porivnog stroja *SMCR*), a s tim i potroška goriva i troškova eksploatacije broda. Ovo je uzrokovano hidrodinamikom brodske forme, jer forme s većim gazom i manjim blok koeficijentom imaju povoljnija hidrodinamička i propulzijska svojstva.

Na Slici 64 su prikazani preferirani projekti na paralelnim osima i pripadni alfanumerički podaci. Na dnu slike su preferirani projekti prikazani na pojedinim ordinatama, a neponderirano subjektivno zadovoljstvo realiziranim vrijednostima pojedinih projektnih atributa je prikazano raznobojnim linijama s pripadnim oznakama. Po sredini slike je prikaz u kojem je situacija obrnuta: neponderirano subjektivno zadovoljstvo realiziranim vrijednostima pojedinih projektnih atributa je prikazano na pripadnim ordinatama, a

preferirani projekti su prikazani raznobojnim linijama s pripadnim oznakama. Gornji dio slike zauzimaju alfanumerički podaci preferiranih projekata.

Najveći profit $P$ je ostvario projekt br. 4 koji je na gornjem grafu označen crvenom linijom s malim kružićima, a na donjem se nalazi na prvoj ordinati. Osim kod profita, stupanj subjektivnog zadovoljstva realiziranim vrijednostima atributa cijene novogradnje $C_{nb}$ i cijene rada $C_{lab}$ je visok, stupanj subjektivnog zadovoljstva vrijednostima mase čelične konstrukcije $W_{st}$ i cijene materijala $C_{mat}$ je zadovoljavajući, dok je stupanj subjektivnog zadovoljstva realizacijom ostalih atributa (ukupne nosivosti $DW$, brzine $v_{tr}$ i volumena skladišta tereta $V_{car}$) je na samoj donjoj granici.

Projekt br. 265 koji je na gornjem grafu označen žutom linijom s poprečnim crticama, a na donjem se nalazi na osmoj ordinati ima nešto manji profit $P$ i veći porivni stroj. Subjektivno zadovoljstvo realiziranim vrijednostima cijene materijala $C_{mat}$, volumena teretnih tankova $V_{car}$ i brzine $v_{tr}$ je nisko, dok je zadovoljstvo realiziranim vrijednostima atributa ukupne nosivosti $DW$ i cijene rada $C_{lab}$ visoko. Zadovoljstvo ostalim projektnim atributima (cijene novogradnje $C_{nb}$ i mase čelične konstrukcije $W_{st}$,) zadovoljavajuće. Generalno bi se moglo zaključiti da je projekt br. 265 kvalitetom na nivou prethodnog projekta br. 4.

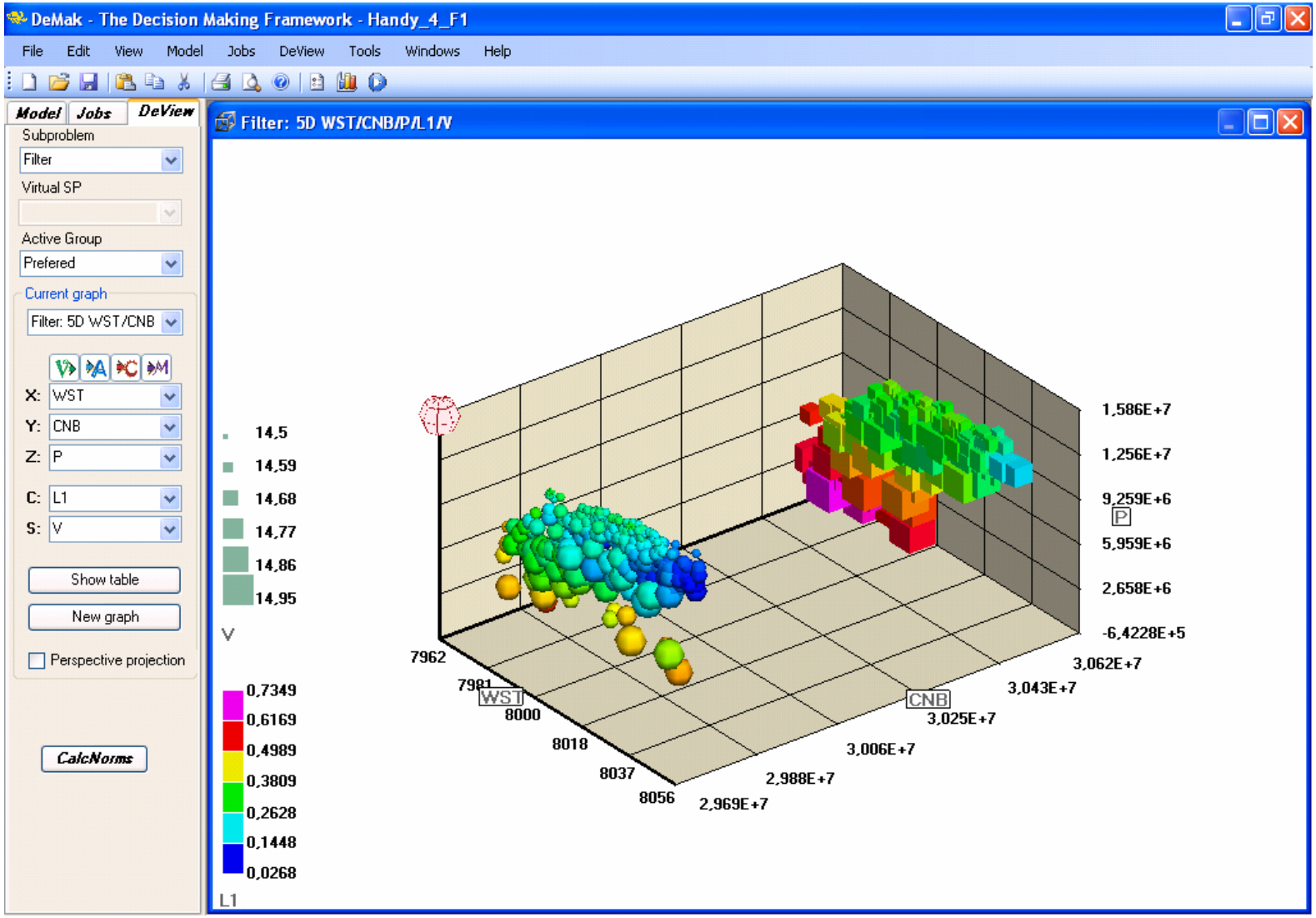
Projekti koji zadovoljavaju traženu brzinu su projekt br. 152 (s većim porivnim strojem) i projekt br. 47 (s manjim porivnim strojem). Projekt br 152 je na gornjem grafu označen svjetloplavom linijom s malim trokutićima, a projekt br. 47 modrom linijom s malim kružićima. Na donjem grafu su predstavljeni četvrtom i drugom ordinatom. Oba projekta nemaju atributa čije su vrijednosti kritične, odnosno na donjoj granici subjektivnog zadovoljstva. Slični su po ostvarenom profitu $P$ (projekt br. 47 je ostvario diskretno veći profit od projekta br. 152), dok je cijena novogradnje $C_{nb}$ kod projekta br. 47 niža nego kod projekta br. 152. Stoga u međusobnoj usporedbi prednost može dati projektu br. 47.

Projekti koji u svojim kategorijama imaju najnižu cijenu novogradnje $C_{nb}$ su projekt br. 251 (s manjim porivnim strojem) i projekt br. 241 (s većim porivnim strojem). Predstavljeni su svjetloplavom linijom s malim trokutićima, odnosno ljubičastom linijom s poprečnim crticama na gornjem grafu, dok se na donjem grafu nalaze na sedmoj i petoj ordinati. Projekt br. 241 ima znatno višu brzinu $v_{tr}$ (malo nižu od zahtijevane) od projekta br. 251, dok projekt br. 241 ima nižu cijenu novogradnje $C_{nb}$ i značajno viši profit $P$, što je očekivano obzirom na skuplji porivni stroj i višu brzinu projekta br. 251. Ostali atributi su realizirani sa sličnim vrijednostima.

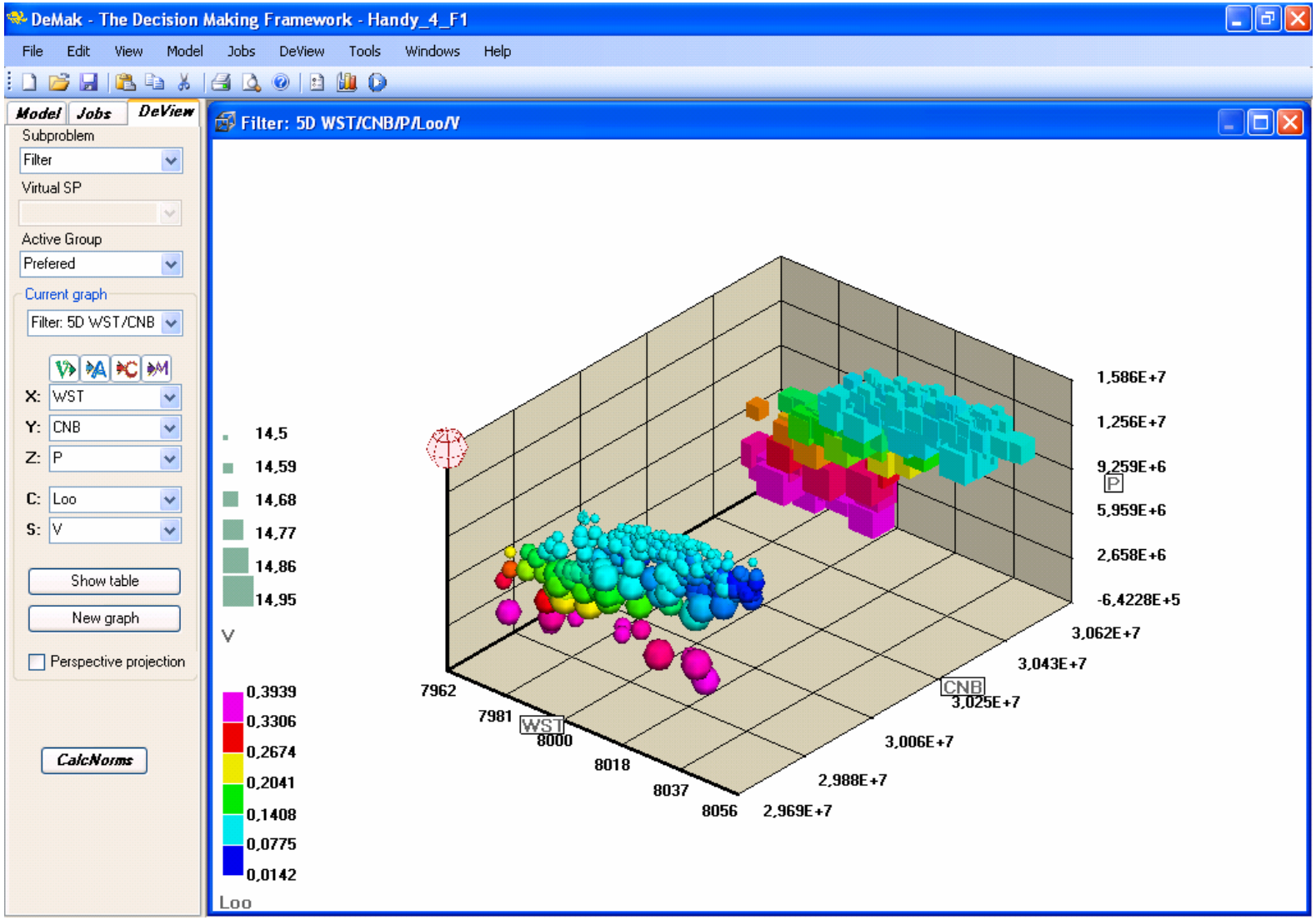
Dva posljednja preferirana projekta su projekt br. 136 koji ima najmanju udaljenost od ideala prema $L_1$ i $L_2$ metrikama i projekt br. 245 koji je najbolji prema $L_\infty$ metrici. Na gornjem je grafu projekt br. 136 označen tamnozelenom linijom s malim kvadratićima, a projekt br. 245 s zelenom linijom s malim zvjezdicama. Na donjem grafu se nalaze na trećoj i šestoj ordinati. Može se uočiti da je kod oba projekta subjektivno zadovoljstvo realiziranim vrijednostima svih atributa vrlo visoko i da nijedan atribut nije realiziran na donjoj granici subjektivnog zadovoljstva. Zadovoljstvo je u oba slučaja najniže kod atributa mase čelične konstrukcije $W_{st}$ (stupanj subjektivnog zadovoljstva je oko 0.35). Stupanj subjektivnog zadovoljstva ispunjenjem svih ostalih atributa se kreće od 0.8 do 1.

Ostvaren je profit $P$ je nešto viši kod projekta br. 245 i za 12-tak posto je niži od maksimalno ostvarenog profita, dok je kod projekta br. 136 15-tak posto niži. Cijena novogradnje $C_{nb}$ je gotovo ista. Projekt br. 136 ima diskretno višu ostvarenu brzinu $v_{tr}$, što je dijelom uzrokovalo razliku u ostvarenom profitu $P$. Iz prethodno iznesenog se može zaključiti da su razlike između projekta br. 136 i projekta br. 245 skoro beznačajne te da nema čvrstih elemenata za davanje prednosti u međusobnoj usporedbi.

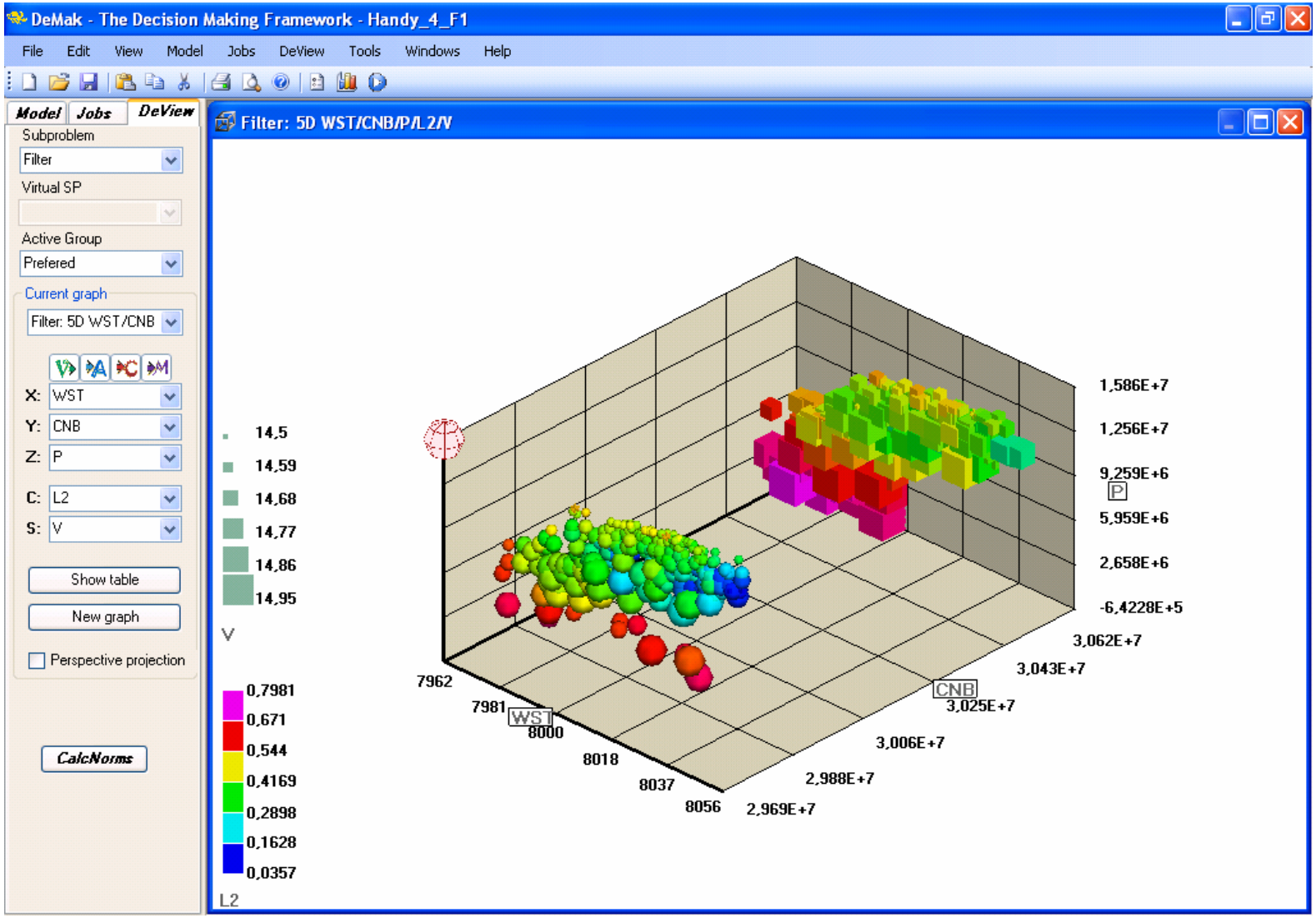
Na Slici 65 koja je posljednja iz ove serije su prikazani isti preferirani projekti. Slika se razlikuje od prethodne po tome što grafovi prikazani s utjecajem pripadnih težinskih faktora. Grafovi su manje pregledni nego na prethodnoj slici jer se linije koje označavaju projekte, odnosno atribute nalaze jedna blizu druge. Međutim, ovakav nam prikaz daje realnu sliku koliki je utjecaj realizacije pojedinog atributa na kvalitetu projekta. Na donjem se grafu može uočiti da se zelena linija s malim kvadratićima koja predstavlja ponderirano subjektivno zadovoljstvo ostvarenim profitom $P$ nalazi dosta iznad linija koje predstavljaju ostale atribute, što znači da je i utjecaj profita adekvatno veći. Na gornjem grafu se ta ista situacija može zapaziti u vidu vrha svih linija koji se nalazi na ordinati koja predstavlja ponderirano subjektivno zadovoljstvo ostvarenim profitom $P$.



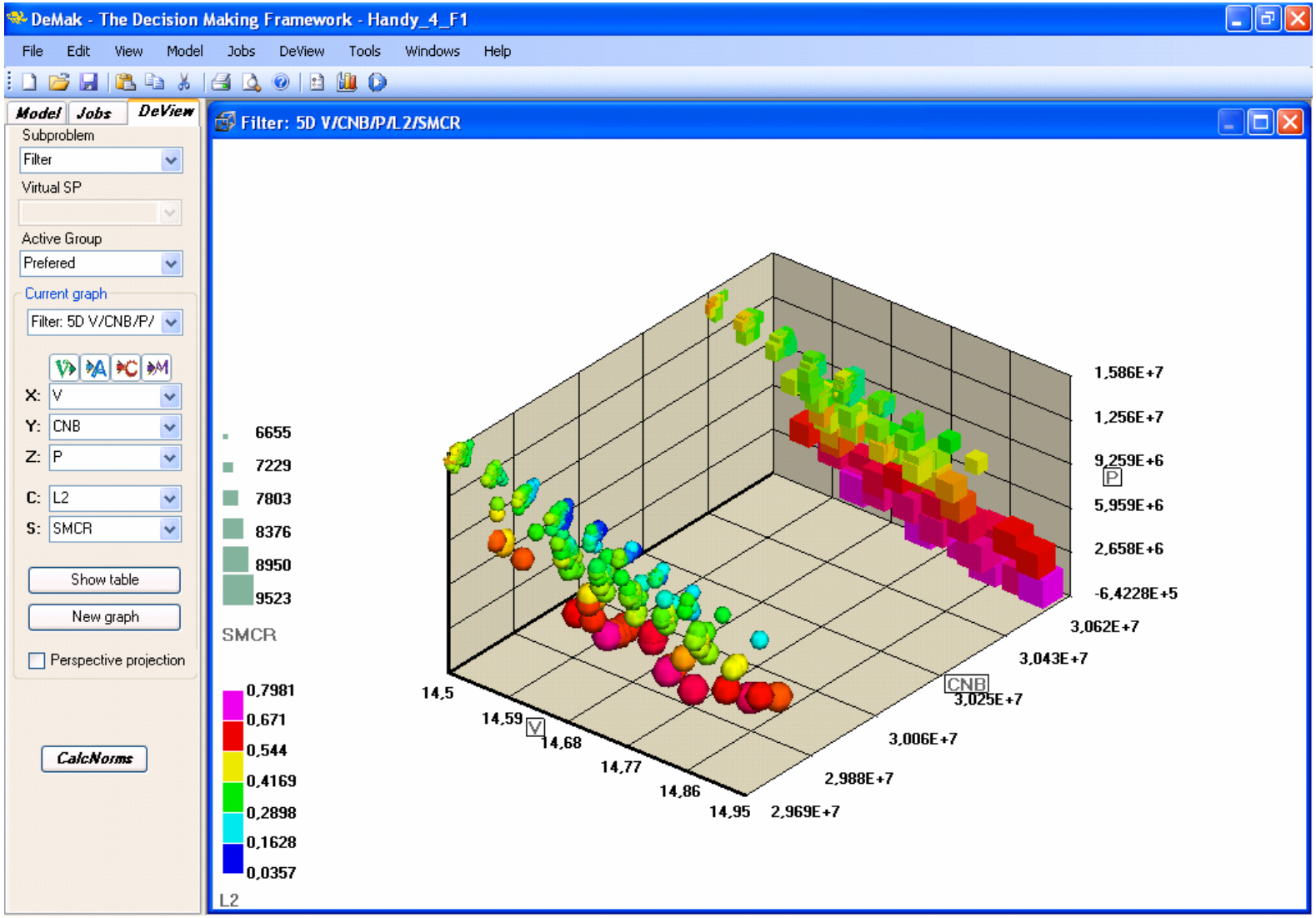

Slika 58 Nedominirani projekti Handymax bulk carrier-a u $W_{st}$ – $C_{nb}$ – $P$ – $v_{tr}$ prostoru s $L_1$ metrikom



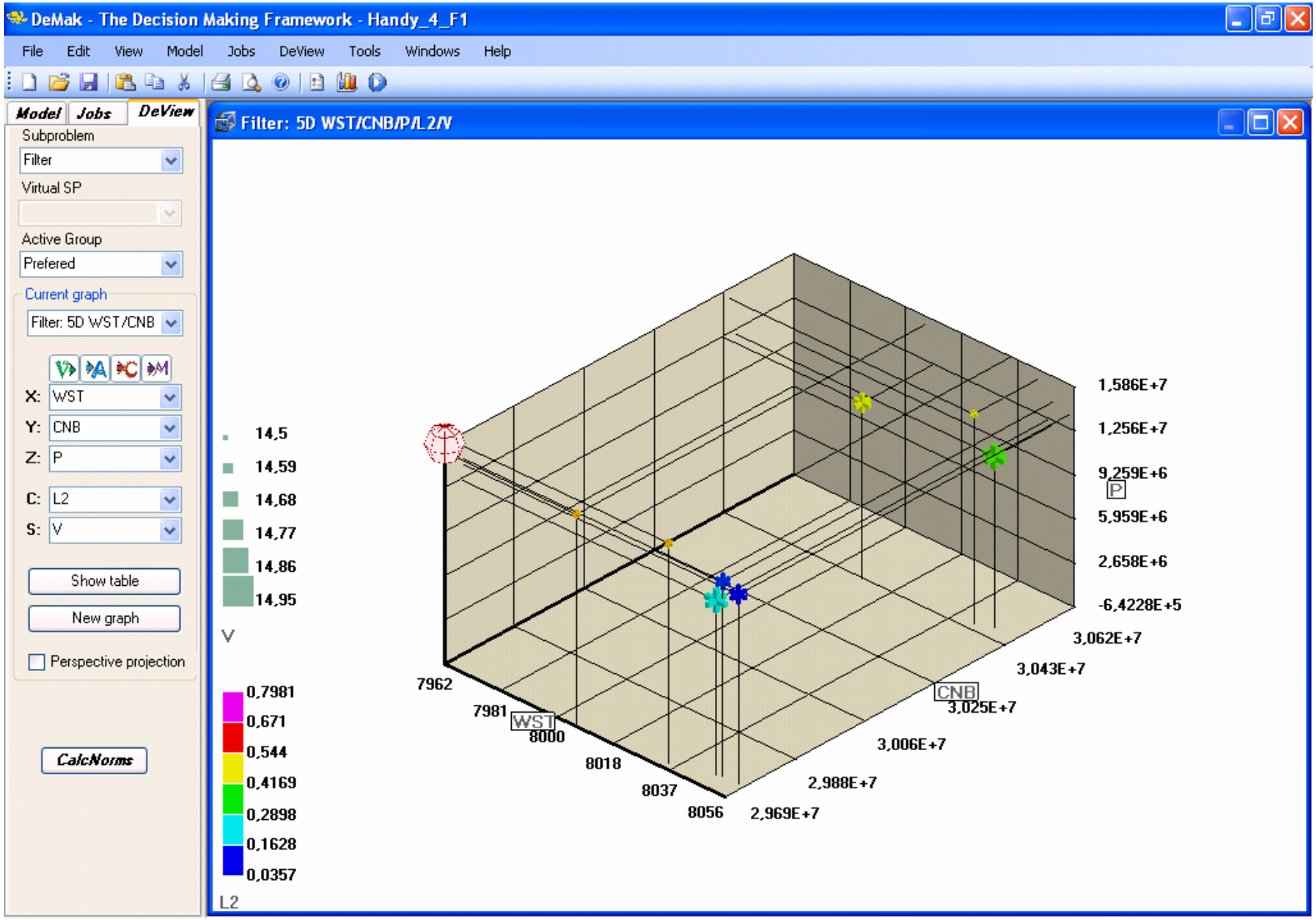

Slika 59 Nedominirani projekti Handymax bulk carrier-a u $W_{st}$ – $C_{nb}$ – $P$ – $v_{tr}$ prostoru s $L_\infty$ metrikom



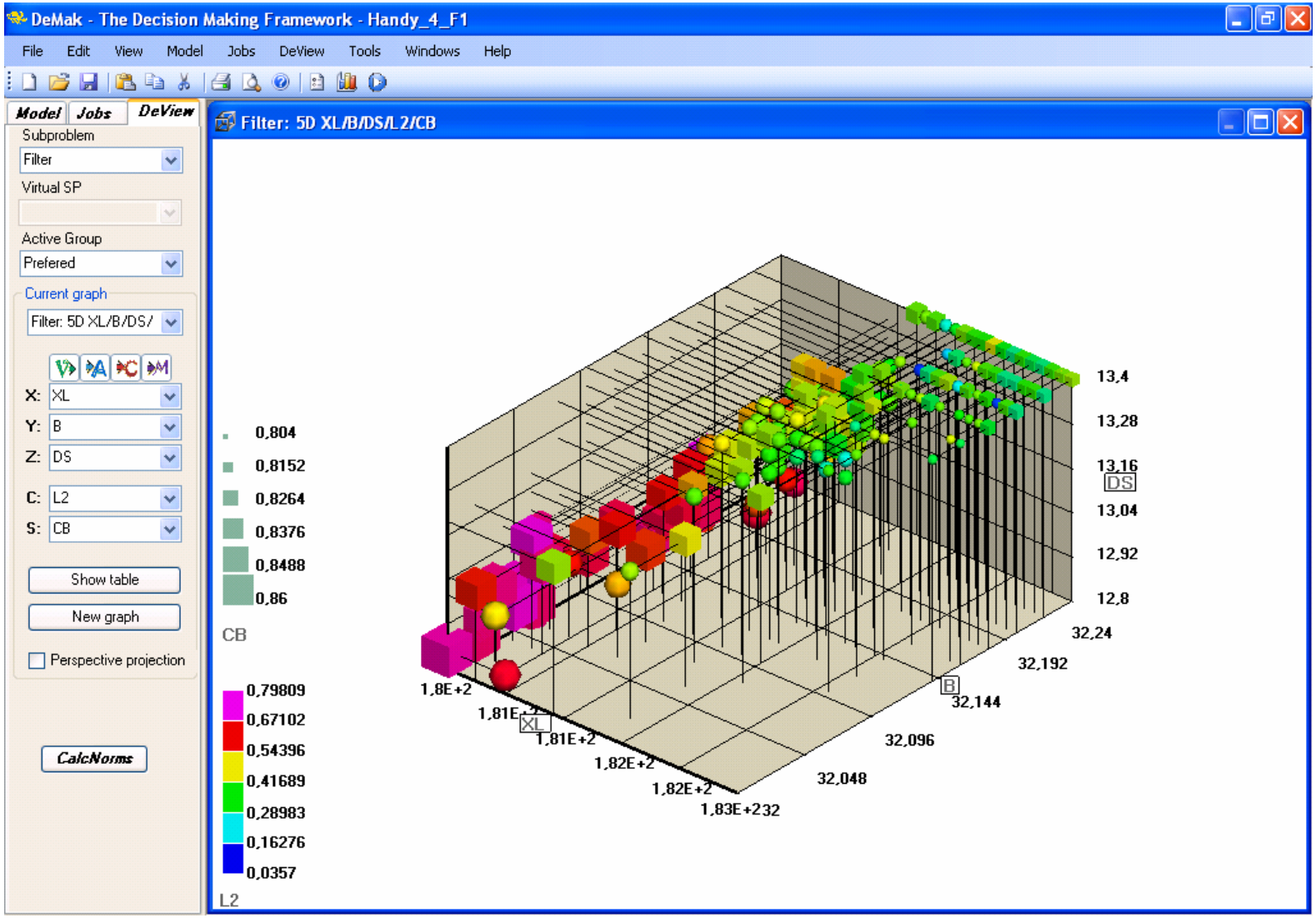

Slika 60 Nedominirani projekti Handymax bulk carrier-a u $W_{st}$ – $C_{nb}$ – $P$ – $v_{tr}$ prostoru s $L_2$ metrikom



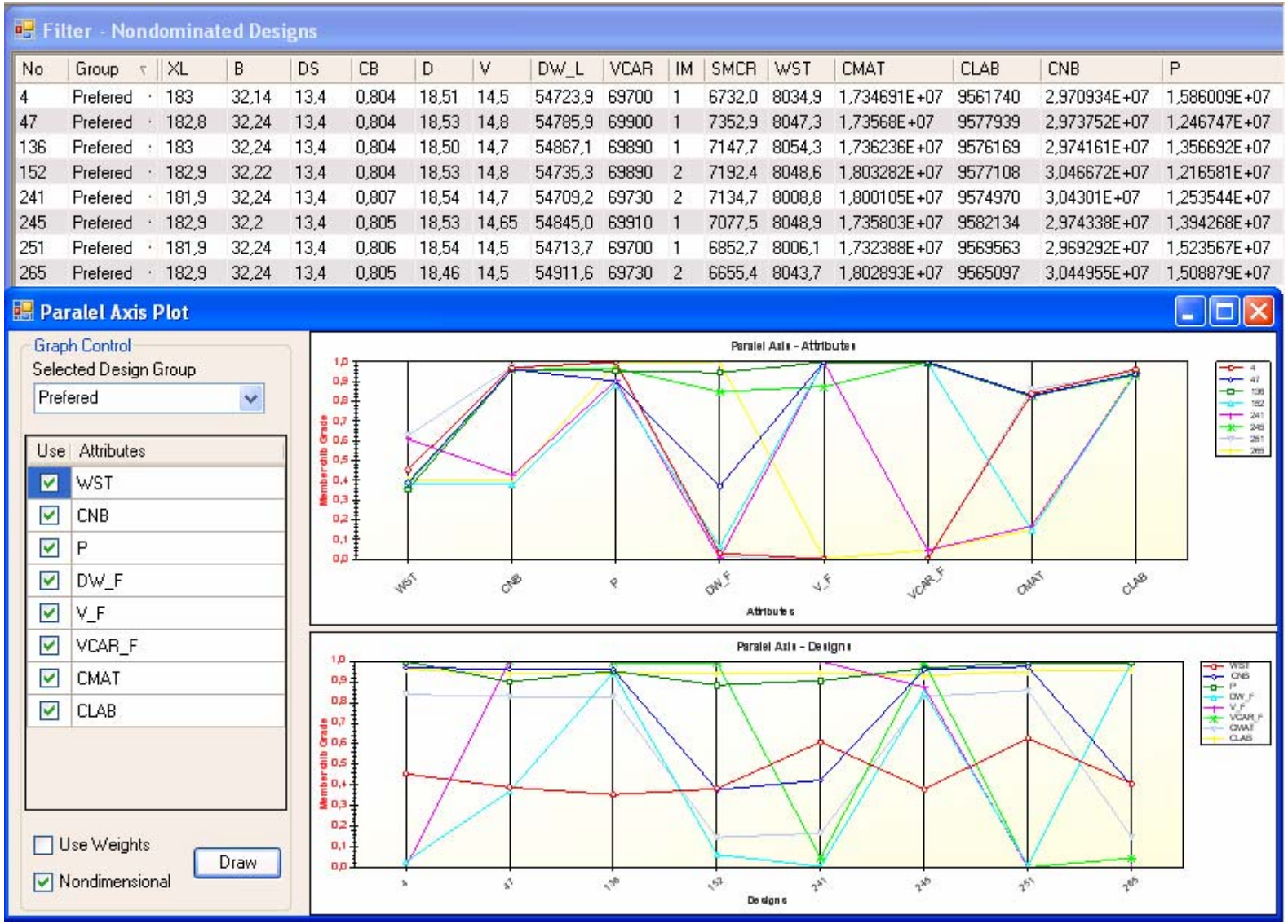

Slika 61 Nedominirani projekti Handymax bulk carrier-a u $v_{tr}$ – $C_{nb}$ – $P$ – $SMCR$ prostoru s L2 metrikom




Slika 62 Preferirani projekti Handymax bulk carrier-a u $W_{st}$ – $C_{nb}$ – $P$ – $v_{tr}$ prostoru s $L_2$ metrikom (1)

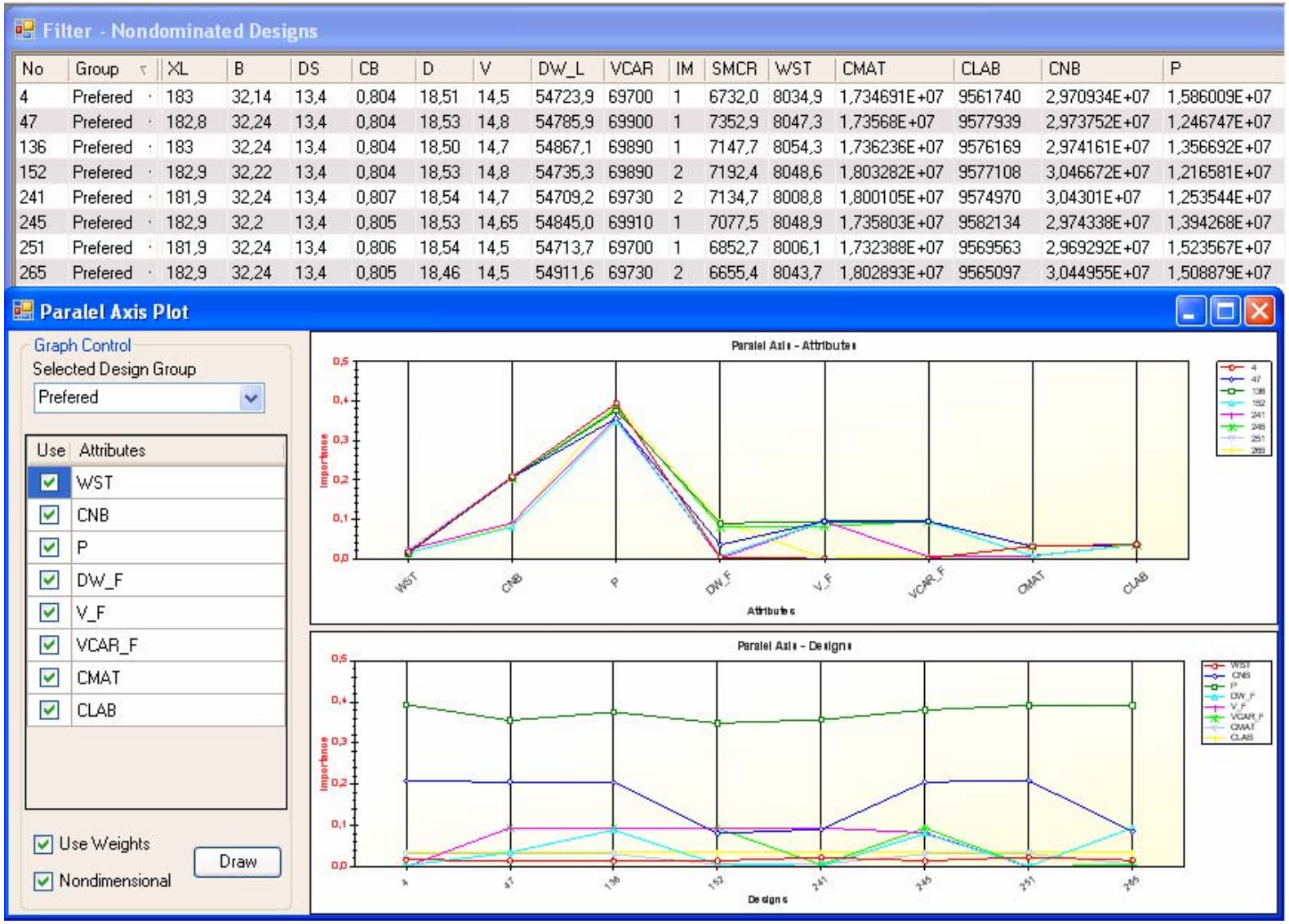



Slika 63 Nedominirani projekti Handymax bulk carrier-a u $L_{pp}$ – $B$ – $d_s$ – $C_B$ prostoru s $L_2$ metrikom




| No | Group | XL | B | DS | CB | D | V | DW_L | VCAR | IM | SMCR | WST | CMAT | CLAB | CNB | P |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | Prefered | 183 | 32,14 | 13,4 | 0,804 | 18,51 | 14,5 | 54723,9 | 69700 | 1 | 6732,0 | 8034,9 | 1,734691E+07 | 9561740 | 2,970934E+07 | 1,586009E+07 |
| 47 | Prefered | 182,8 | 32,24 | 13,4 | 0,804 | 18,53 | 14,8 | 54785,9 | 69900 | 1 | 7352,9 | 8047,3 | 1,73568E+07 | 9577939 | 2,973752E+07 | 1,246747E+07 |
| 136 | Prefered | 183 | 32,24 | 13,4 | 0,804 | 18,50 | 14,7 | 54867,1 | 69890 | 1 | 7147,7 | 8054,3 | 1,736236E+07 | 9576169 | 2,974161E+07 | 1,356692E+07 |
| 152 | Prefered | 182,9 | 32,22 | 13,4 | 0,804 | 18,53 | 14,8 | 54735,3 | 69890 | 2 | 7192,4 | 8048,6 | 1,803282E+07 | 9577108 | 3,046672E+07 | 1,216581E+07 |
| 241 | Prefered | 181,9 | 32,24 | 13,4 | 0,807 | 18,54 | 14,7 | 54709,2 | 69730 | 2 | 7134,7 | 8008,8 | 1,800105E+07 | 9574970 | 3,04301E+07 | 1,253544E+07 |
| 245 | Prefered | 182,9 | 32,2 | 13,4 | 0,805 | 18,53 | 14,65 | 54845,0 | 69910 | 1 | 7077,5 | 8048,9 | 1,735803E+07 | 9582134 | 2,974338E+07 | 1,394268E+07 |
| 251 | Prefered | 181,9 | 32,24 | 13,4 | 0,806 | 18,54 | 14,5 | 54713,7 | 69700 | 1 | 6852,7 | 8006,1 | 1,732388E+07 | 9569563 | 2,969292E+07 | 1,523567E+07 |
| 265 | Prefered | 182,9 | 32,24 | 13,4 | 0,805 | 18,46 | 14,5 | 54911,6 | 69730 | 2 | 6655,4 | 8043,7 | 1,802893E+07 | 9565097 | 3,044955E+07 | 1,508879E+07 |

Slika 64 Preferirani projekti Handymax bulk carrier-a prikazani na paralelnim osima (1)




| No | Group | XL | B | DS | CB | D | V | DW_L | VCAR | IM | SMCR | WST | CMAT | CLAB | CNB | P |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | Prefered | 183 | 32,14 | 13,4 | 0,804 | 18,51 | 14,5 | 54723,9 | 69700 | 1 | 6732,0 | 8034,9 | 1,734691E+07 | 9561740 | 2,970934E+07 | 1,586009E+07 |
| 47 | Prefered | 182,8 | 32,24 | 13,4 | 0,804 | 18,53 | 14,8 | 54785,9 | 69900 | 1 | 7352,9 | 8047,3 | 1,73568E+07 | 9577939 | 2,973752E+07 | 1,246747E+07 |
| 136 | Prefered | 183 | 32,24 | 13,4 | 0,804 | 18,50 | 14,7 | 54867,1 | 69890 | 1 | 7147,7 | 8054,3 | 1,736236E+07 | 9576169 | 2,974161E+07 | 1,356692E+07 |
| 152 | Prefered | 182,9 | 32,22 | 13,4 | 0,804 | 18,53 | 14,8 | 54735,3 | 69890 | 2 | 7192,4 | 8048,6 | 1,803282E+07 | 9577108 | 3,046672E+07 | 1,216581E+07 |
| 241 | Prefered | 181,9 | 32,24 | 13,4 | 0,807 | 18,54 | 14,7 | 54709,2 | 69730 | 2 | 7134,7 | 8008,8 | 1,800105E+07 | 9574970 | 3,04301E+07 | 1,253544E+07 |
| 245 | Prefered | 182,9 | 32,2 | 13,4 | 0,805 | 18,53 | 14,65 | 54845,0 | 69910 | 1 | 7077,5 | 8048,9 | 1,735803E+07 | 9582134 | 2,974338E+07 | 1,394268E+07 |
| 251 | Prefered | 181,9 | 32,24 | 13,4 | 0,806 | 18,54 | 14,5 | 54713,7 | 69700 | 1 | 6852,7 | 8006,1 | 1,732388E+07 | 9569563 | 2,969292E+07 | 1,523567E+07 |
| 265 | Prefered | 182,9 | 32,24 | 13,4 | 0,805 | 18,46 | 14,5 | 54911,6 | 69730 | 2 | 6655,4 | 8043,7 | 1,802893E+07 | 9565097 | 3,044955E+07 | 1,508879E+07 |

Slika 65 Preferirani projekti Handymax bulk carrier-a prikazani na paralelnim osima (2)

I u ovom primjeru je zanimljiva usporedba jednog od kvalitetnih suvremenih Handymax bulk carrier-a s jednim od preferiranih projekata. Pomoću matematičkog modela prezentiranog u radu je izrađen projekt Handymax bulk carrier-a koji je optimiran isključivo s ciljem minimiziranja cijene novogradnje. Projekt br. 47 je odabran za usporedbu jer na maksimalnom gazu ima ostvarenu brzinu od 14.8 čv, što odgovara traženoj brzini. Usporedba je prikazana sljedećom tablicom.

| Osnovne karakteristike | Projekt | |
|---|---|---|
| | Suvremeni Handymax bulk carrier | Preferirani projekt br. 47 |
| $L_{pp}$ (m) | 183.0 | 182.8 |
| $B$ (m) | 32.24 | 32.24 |
| $d_s$ (m) | 12.6 | 13.4 |
| $C_B$ (-) | 0.858 | 0.804 |
| $D$ (m) | 17.92 | 18.53 |
| $DW$ (t) | 55000 | 54786 |
| $V_{car}$ ($m^3$) | 70000 | 69900 |
| $v_{tr}$ (čv) | 14.8 | 14.8 |
| $CSR$ (kW) | 8429 | 6618 |
| $SMCR$ (kW) | 9366 | 7353 |
| Porivni stroj | 6S50MC-C7 | 6S50MC-C7 |
| $W_{st}$ (t) | 8116 | 8047 |
| $C_{mat}$ (mUS$) | 17.41 | 17.36 |
| $C_{lab}$ (mUS$) | 9.76 | 9.58 |
| $C_{nb}$ (mUS$) | 29.99 | 29.74 |
| $P$ (mUS$) | 0 | 12.47 |

Tablica 51 Usporedba suvremenog Handymax bulk carrier-a s preferiranim projektom

Osnovne karakteristike prezentiranog projekta suvremenog Handymax bulk carrier-a gotovo idealno poklapaju s karakteristikama suvremenih Handymax bulk carrier-a prikazanih u Tablici 36, što i u ovom slučaju dokazuje da se primijenjeni projektni model zasniva na najboljim suvremenim Handymax bulk carrier-ima. Preferirani projekt br. 47 ostvaruje 12.47 milijuna US$ profita, dok u istim uvjetima poslovanja suvremeni Handymax bulk carrier posluje bez profita. Oba projekta imaju gotovo istu cijenu koštanja $C_{nb}$.

Osnovna razlika između promatranih projekata je u gazu $d_s$ i blok koeficijentu $C_B$. Preferirani projekt ima veći gaz $d_s$, te sukladno tome manji blok koeficijent $C_B$. Time je ostvaren hidrodinamički povoljniji odnos $B/d_s$, te kvalitetnija slika sustrujanja i uvjeti za rad propelera. Osim toga, zbog potrebne manje snage, porivni stroj radi pri nižim okretajima, što također dovodi do poboljšanja stupnja djelovanja brodskog vijka. Rezultat toga je sniženje snage porivnog stroja, u konkretnoj usporedbi snaga je niža za

preko 21%. I u ovom se slučaju mogu ponoviti zaključci iz prethodnog: primjena izložene metodologije ima za direktnu posljedicu smanjenje potrošnje goriva, troškova putovanja i eksploatacije broda. Ponovno treba istaknuti ekološke prednosti ovakvog projekta – smanjenje emisije $CO_2$ i ostalih štetnih plinova primjenom nove metodologije projektiranja broda.

Ponovno je provedena analiza utjecaja ostvarene brzine projekta $v_{tr}$ na ostale atribute, prvenstveno profit broda *P*. Preferirani projekti iz naredne tablice su odabrani po kriteriju najvećeg ostvarenog profita za zadanu brzinu. Odabrani su nedominirani projekti br. 4, 16, 325 i 47 koji su ostvarili brzine od 14.5, 14.6, 14.7 i 14.8 čvorova. Preferirani projekt br. 47 je ujedno analiziran u prethodnoj tablici i poslužio je za usporedbu s projektom suvremenog Handymax bulk carrier-a. U tablici su prikazane samo one karakteristike projekata na koje je ostvarena brzina imala dominantan utjecaj, dok su ostali atributi ispušteni radi jasnoće prikaza.

| Osnovne karakteristike | Preferirani projekti | | | |
|---|---|---|---|---|
| | br. 4 | br. 16 | br. 325 | br. 47 |
| $v_{tr}$ (čv) | 14.5 | 14.6 | 14.7 | 14.8 |
| $L_{pp}$ (m) | 183.0 | 183.0 | 182.7 | 182.8 |
| *B* (m) | 32.14 | 32.22 | 32.20 | 32.24 |
| $d_s$ (m) | 13.40 | 13.40 | 13.40 | 13.40 |
| $C_B$ (-) | 0.804 | 0.804 | 0.804 | 0.804 |
| *CSR* (kW) | 6059 | 6251 | 6428 | 6618 |
| *SMCR* (kW) | 6732 | 6946 | 7142 | 7353 |
| Porivni stroj | 6S50MC-C7 | 6S50MC-C7 | 6S50MC-C7 | 6S50MC-C7 |
| $C_{nb}$ (mUS$) | 29.71 | 29.74 | 29.72 | 29.74 |
| *P* (mUS$) | 15.86 | 14.66 | 13.62 | 12.47 |

Tablica 52 Usporedba preferiranih projekata prema ostvarenoj brzini $v_{tr}$

Može se uočiti da sva četiri projekta imaju skoro identične osnovne izmjere i porivni stroj, pa time i cijenu $C_{nb}$. Razlikuju se samo u dosegnutoj brzini $v_{tr}$ i ona iznosi 14.5, 14.6, 14.7 i 14.8 čvorova. Utjecaj ovako malih porasta brzine od 0.1 čvora (cca 0.7%) donosi porast snage porivnog stroja *CSR* za oko 170-190 kW, odnosno cca 3%. Nadalje, porast brzine za svaki dodatni 0.1 čvor ima za posljedicu (u ovom području brzina) pad profita od cca 1-1.2 milijuna US$. Profit je ukupno pao za cca 3.4 milijuna US$ kod projekta br. 47 koji ima zahtijevanu brzinu od 14.8 čvorova u odnosu na projekt br. 4 koji ima ostvarenu brzinu od 14.5 čvorova i najveći profit *P* od 15.86 milijuna US$.

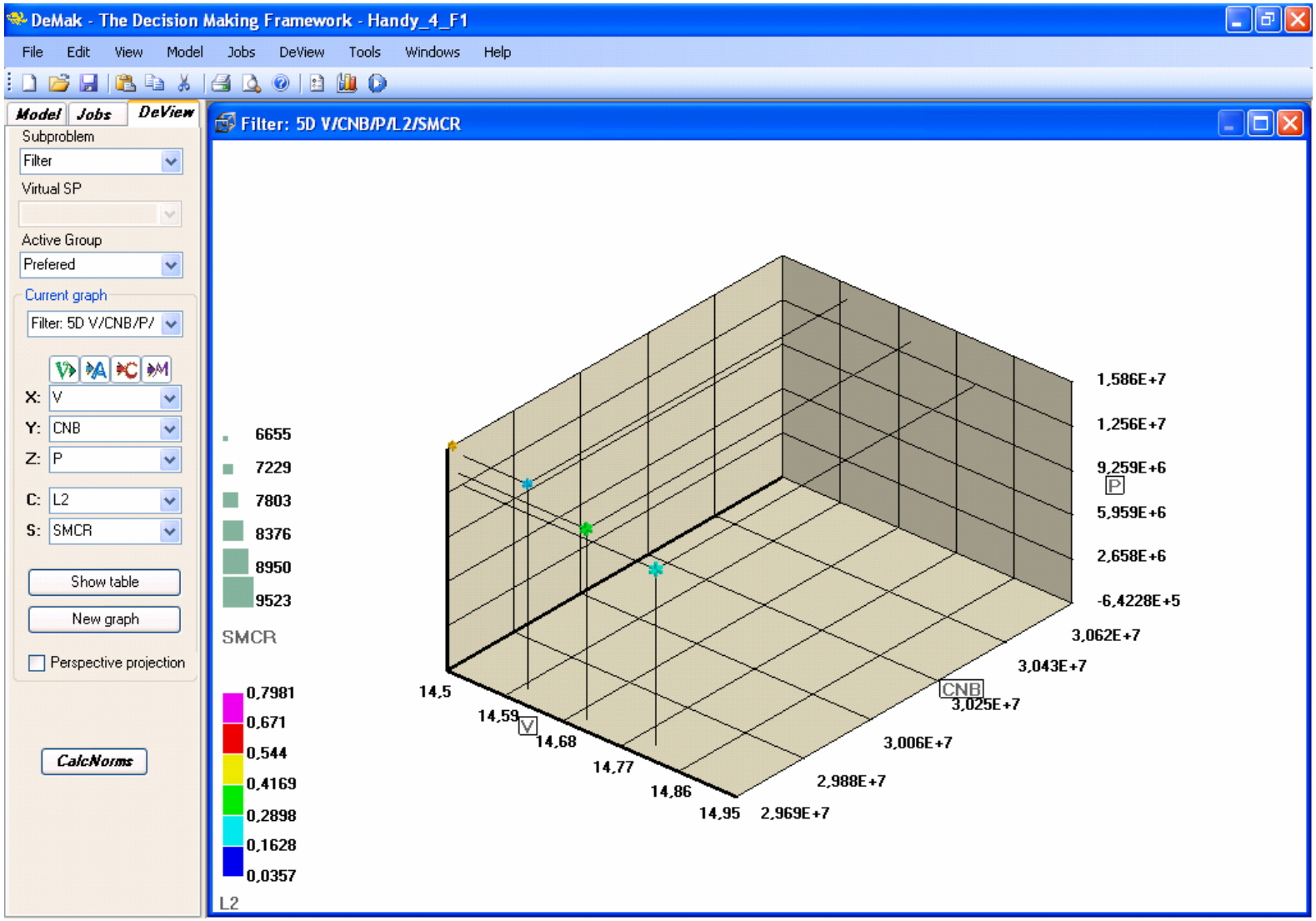
I u ovom se primjeru može zaključiti da se značajna povećanja profita *P*, odnosno smanjenje potrošnje goriva, troškova putovanja i troškova eksploatacije broda mogu postići umjerenim sniženjem brzine. Ukoliko bi se konačno odabrao projekt br. 325 koji postiže brzinu $v_{tr}$ od 14.7 čvorova (samo 0.1 čvor nižu od zahtijevane) postigla bi se

ušteda goriva od cca 24% u odnosu na projekt suvremenog Handymax bulk carrier-a, a profit bi bio veći za oko 13.6 milijuna US$.

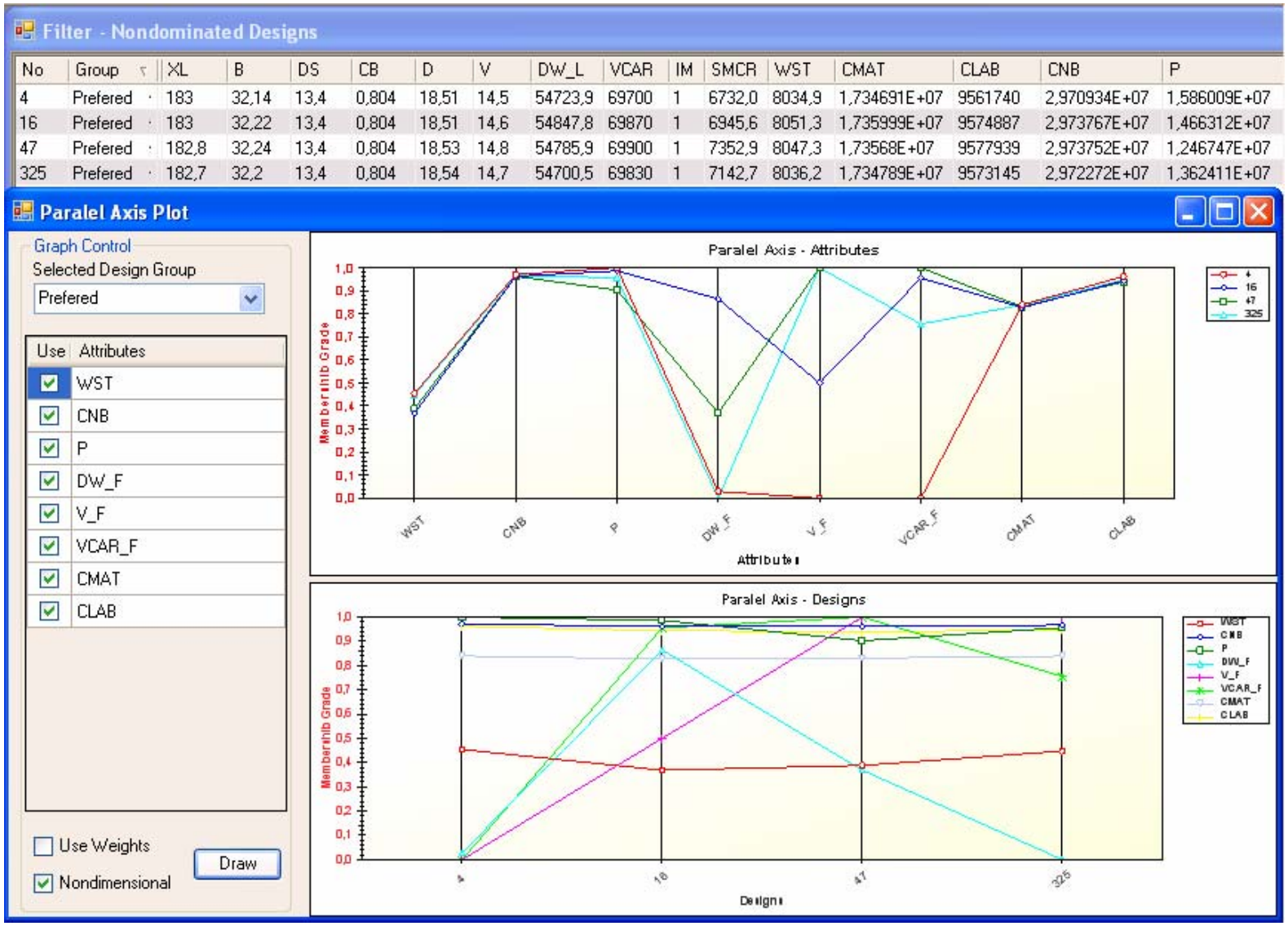
Na sljedećim slikama su prikazani preferirani projekti br. 4, 16, 325 i 47 u višedimenzionalnom koordinatnom sustavu i na paralelnim osima.

Na Slici 66 projekti su prikazani u koordinatnom sustavu s brzinom $v_{tr}$, cijenom novogradnje $C_{nb}$ i profitom $P$ na pojedinim koordinatnim osima. Selektirana maksimalna snaga porivnog stroja *SMCR* je predstavljena veličinom oznake, a udaljenost preferiranih projekata od utopije prema odabranoj $L_2$ metrici je predstavljeno spektrom boja. Može se uočiti kako profit gotovo linearno pada s porastom brzine. Preferirani projekti su različito udaljeni od ideala.

Slika 67 prikazuje preferirane projekte na paralelnim osima. Stupnjevi zadovoljstva ostvarenim vrijednostima atributa su neponderirani zbog bolje preglednosti. Projekt br. 4 je na gornjem grafu označen crvenom linijom s malim kružićima, a na donjem grafu se nalazi na prvoj ordinati. Projekt br. 16 je označen modrom linijom s malim kružićima, odnosno nalazi se na drugoj ordinati. Projekt br. 47 je označen zelenom linijom s malim kvadratićima, a nalazi se na trećoj ordinati. Projekt br. 325 je na gornjem grafu označen plavom linijom s malim trokutićima, a na donjem grafu se nalazi na četvrtoj ordinati. Može se uočiti da projekti br. 16 i 47 nemaju atributa koji su realizirani s kritičnim vrijednostima. Kod projekta br. 325 atribut ukupne nosivosti *DW* je na samoj donjoj granici subjektivnog zadovoljstva. Projekt br. 4 koji ima najveći ostvareni profit *P* ima ujedno i granično zadovoljene atribute brzine $v_{tr}$, ukupne nosivosti *DW* i volumena skladišta tereta $V_{car}$.




Slika 66 Preferirani projekti Handymax bulk carrier-a u $W_{st}$ – $C_{nb}$ – $P$ – $v_{tr}$ prostoru s $L_2$ metrikom (2)




Slika 67 Preferirani projekti Handymax bulk carrier-a prikazani na paralelnim osima (3)

U ovom se slučaju mogu istaknuti sljedeći aspekti primijenjene projektne metodologije:

1. Nova metodologija ne traži nikakve „revolucionarne“ iskorake u projektiranju koji bi mogli ugroziti ili odložiti njenu primjenu,
2. Nova metodologija omogućava analiziranje utjecajnih parametara na kvalitetu poslovanja broda,
3. Isti (ili diskretno viši) investicijski trošak (cijena novogradnje $C_{nb}$) ne povećava rizik investicije i ne predstavlja moguću poteškoću za aplikaciju metodologije.

Ovaj primjer ponovno dokazuje opravdanost primjene nove metodologije i utemeljenost očekivanih rezultata.

## 15.11 Analiza robustnosti nedominiranih projekata Handymax bulk carrier-a

Kao i u prethodnom primjeru, analiza robustnosti je provedena u odnosu na projektne parametre koji značajno utječu na rezultat poslovanja brodogradilišta i pomorske kompanije, a koji su u potpunosti izvan mogućnosti kontrole ili barem preciznog predviđanja budućeg kretanja od strane brodogradilišta i pomorske kompanije. Nadalje su ponovljeni parametri koji imaju dominantan utjecaj na rezultat optimizacijskog postupka osnivanja trgovačkih brodova, prvenstveno na ostvareni profit *P*:

1. Fluktuacija US$ u odnosu na košaru valuta, prvenstveno € i kune,
2. Cijena brodograđevnog čelika,
3. Cijena pogonskog goriva.

Isti parametri će biti varirani u granicama prikazanim sljedećom tablicom.

| Parametar | Minimalna očekivana vrijednost | Aktualna vrijednost | Maksimalna očekivana vrijednost |
|---|---|---|---|
| *ER* (-) | 1.25 | 1.35 | 1.45 |
| $c_{st}$ (US$/t) | 600 | 700 | 800 |
| $c_{fuel}$ (US$/t) | 400 | 470 | 540 |

Tablica 53 Variranje projektnih parametara Handymax bulk carrier-a

Analiza je ponovno provedena pomoću ortogonalnog polja L9 prikazane u Poglavlju 13, Tablica 17, s tim da su iskorištena prva tri stupca matrice.

Rezultati analize su prikazani narednim slikama. Na Slici 68 je prikazan koordinatni sustav s *SNR* mjerom robustnosti, standardnom devijacijom $\sigma$ i profitom *P* na pripadnim koordinatnim osima. Spektrom boja je označena $L_2$ metrika (plavi dio spektra je bliži idealu), a veličinom oznake je označena brzina broda (veća oznaka predstavlja veću brzinu). Kuglama su označeni nedominirani projekti s manjim porivnim strojem, a kockama nedominirani projekti s većim porivnim strojem. Projekti su raspoređeni u dva

usporedna niza od kojih svaki sadrži projekte s jednim od porivnih strojeva. Projekti s manjim strojem su pretežno hladnih boja (plavi i zeleni), a projekti s većim strojem su pretežno toplih boja (žuti, crveni i zeleni). Generalno se može reći da su projekti s manjim strojem su bliži utopiji. Projekti s većim strojem ostvaruju veće brzine. Usporedni nizovi se protežu od projekata s najmanjim profitom, najvećom brzinom, najmanjom mjerom robustnosti i najvećom devijacijom profita prema projektima s najvećim profitom, najmanjom brzinom, najvećom robustnošću i najmanjom devijacijom. I u ovom slučaju se može izvući zaključak koji je vrijedio za prethodni primjer: projekti koji su uspješniji i s većim profitom ujedno i robustniji na promjene ulaznih parametara, odnosno da rezultati poslovanja broda manje variraju promjenom parametara. To ponovno potvrđuje očekivanje da su bolji projekti ujedno i robustniji. Još jednom je potvrđeno da smanjenje potrošnje goriva dominantno utječe na kvalitetu poslovanja broda, pa su stoga projekti s manjom potrošnjom goriva i većim profitom ujedno i robustniji na promjenu cijene goriva kao vodeći remetilački faktor.

Na Slici 69 je prikazan koordinatni sustav s brzinom broda $v_{tr}$, standardnom devijacijom $\sigma$ i *SNR* mjerom robustnosti na odgovarajućim koordinatnim osima. Kao i na prethodnoj slici spektrom boja je označena $L_2$ metrika, dok je veličinom oznake pridjeljena profitu broda *P* (veća oznaka predstavlja veći profit). Kugle i kocke označavaju nedominirane projekte s manjim porivnim strojem i s većim porivnim strojem. Ova slika vrlo jasno prikazuje utjecaj brzine broda na robustnost projekta. Nizovi nedominiranih projektnih rješenja podijeljeni prema ostvarenoj brzini $v_{tr}$. Projekti koji imaju najnižu brzinu ujedno imaju i najveći profit, najveću mjeru robustnosti i najmanju devijaciju. Također se može uočiti da u ovom slučaju projekti nisu jako strogo segregirani obzirom na odabrani porivni stroj.

Naredna Slika 70 prikazuje Pareto frontu u koordinatnom sustavu s gazom broda $d_s$, standardnom devijacijom $\sigma$ i mjerom robustnosti *SNR* na pojedinim koordinatnim osima. Spektrom boja je označena $L_2$ metrika, a veličinom kugli i kocki je označen profit broda *P* (veća oznaka predstavlja veći profit). Prikaz je zanimljiv zbog uvida u utjecaj osnovnih izmjera broda na ostvareni profit i robustnost projekta. U ovom slučaju gaz broda $d_s$ ima dominantan utjecaj, jer su duljina broda $L_{pp}$ i širina *B* jako limitirani. Kao što se može lijepo uočiti, prevladavajući broj nedominiranih projekata velike robustnosti, male devijacije i s većim profitom smjestio se u područje velikog gaza broda. Projekti većeg gaza $d_s$ (posljedično manjeg blok koeficijenta $C_B$) imaju kvalitetnija hidrodinamička i propulzijska svojstva, pa stoga i nižu angažiranu snagu porivnog stroja i potrošnju goriva. Nadalje to vodi nižim troškovima putovanja $C_{voy}$ i eksploatacije broda $C_{op}$, odnosno većem realiziranom profitu *P*. Takvi projekti su ujedno i robustniji na variranje ulaznih parametara te imaju manju devijaciju realiziranog profita.

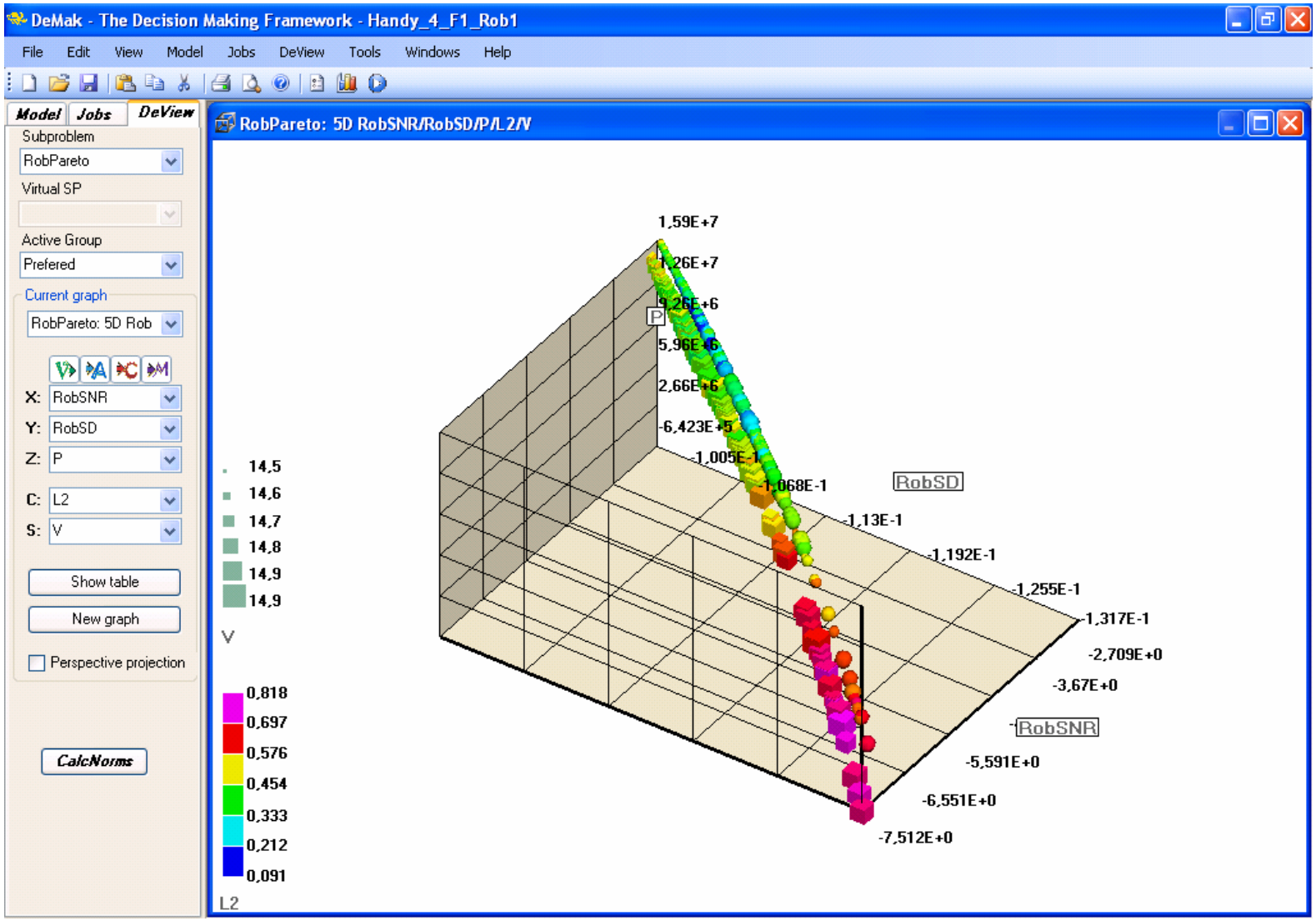
Slika 71 omogućuje daljnju analizu utjecaja osnovnih izmjera broda na realizirani profit *P* te robustnost i devijaciju realiziranog profita. Nedominirani projekti su prikazani u koordinatnom sustavu s gazom broda $d_s$, blok koeficijentom $C_B$ i mjerom robustnosti *SNR* na pojedinim koordinatnim osima. Spektrom boja je označena $L_2$ metrika, a veličinom oznake je označen profit broda *P* (veća oznaka predstavlja veći profit). Prikaz potvrđuje komentare prethodne slike, prevladavajući broj optimalnih projekata se nalazi

u području velikog gaza broda $d_s$ i niskog blok koeficijenta $C_B$. Ti projekti ujedno imaju veću mjeru robustnosti *SNR* i veći realizirani profit *P*.

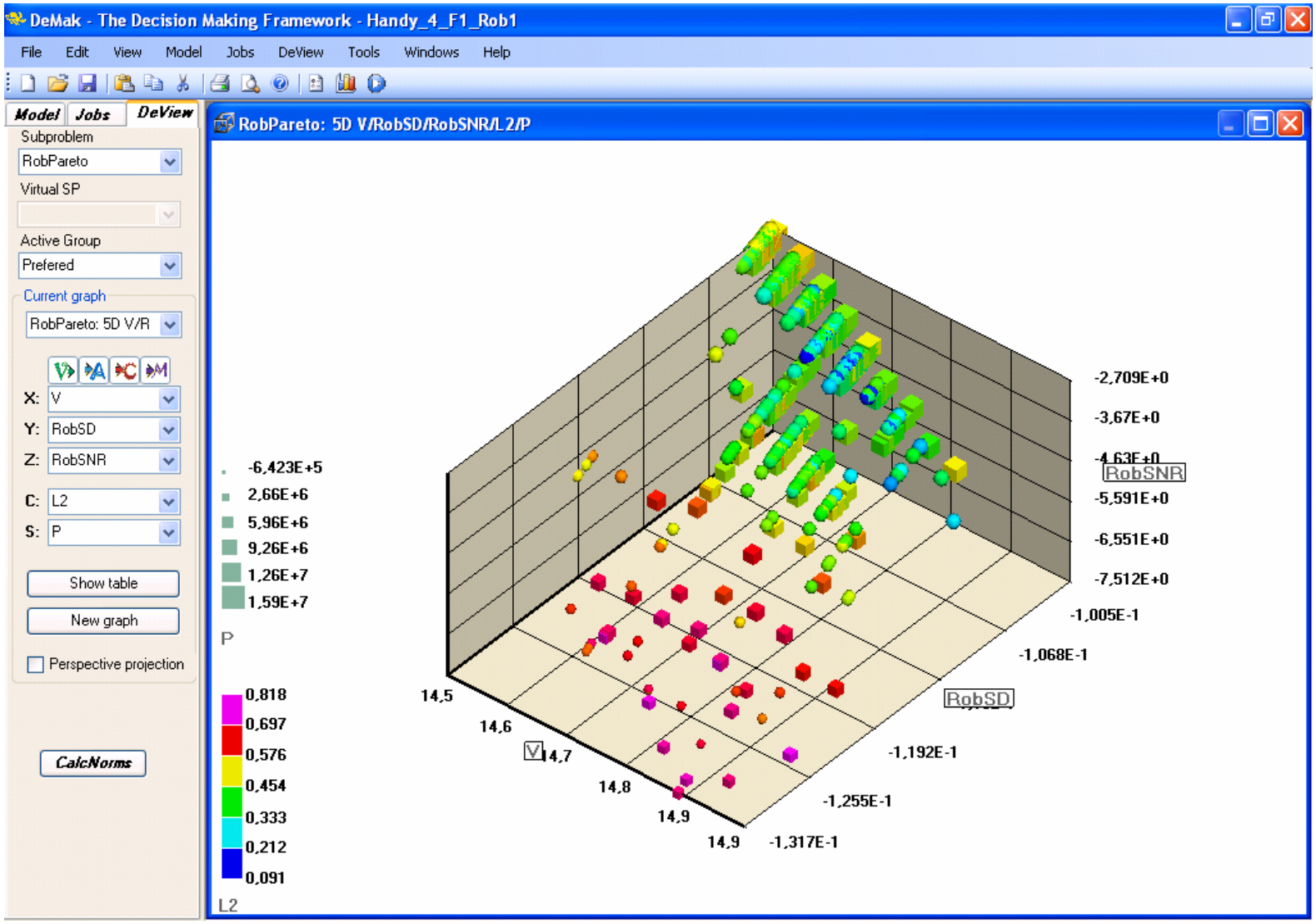
Naredna Slika 72 ima na koordinatnim osima osnovne karakteristike broda $d_s$ i $C_B$, te profit broda *P*. Mjera robustnosti *SNR* je označena spektrom boja (veća robustnost je predstavljena ljubičasto-crvenim dijelom spektra), standardna devijacija veličinom oznake (manja devijacija je predstavljena većim kuglama, odnosno kockama). Na slici se može jasno uočiti da su robustniji projekti manje devijacije profita koncentrirani u području većih gazova broda $d_s$ i manjih blok koeficijenata $C_B$. Ovo dodatno potvrđuje ranije iznijeta zapažanja o utjecaju osnovnih izmjera na realizirani profit broda.

Slika 73 je posljednja slika iz ove serije. Na njoj je analiziran utjecaj brzine broda $v_{tr}$ i snage porivnog stroja *SMCR* na realizirani profit *P*, standardnu devijaciju profita $\sigma$ i mjeru robustnosti *SNR*. Na pripadnim koordinatnim osima su $v_{tr}$, *SMCR* i *P*. Standardna devijacija je predstavljena veličinom oznake (veće kocke i kugle su manja devijacija), a robustnost je predstavljena spektrom boja (ljubičasto-crveni dio spektra je veća robustnost). I na ovoj slici je lako uočljivo da veći profit i bolju robustnost s manjom devijacijom ostvaruju projekti niže brzine, odnosno niže angažirane snage. Ljubičasto obojane kugle i kocke većih dimenzija koje predstavljaju projekte veće robustnosti s nižim stupnjem devijacije su koncentrirane u području niskih brzina i niskih snaga porivnog stroja.

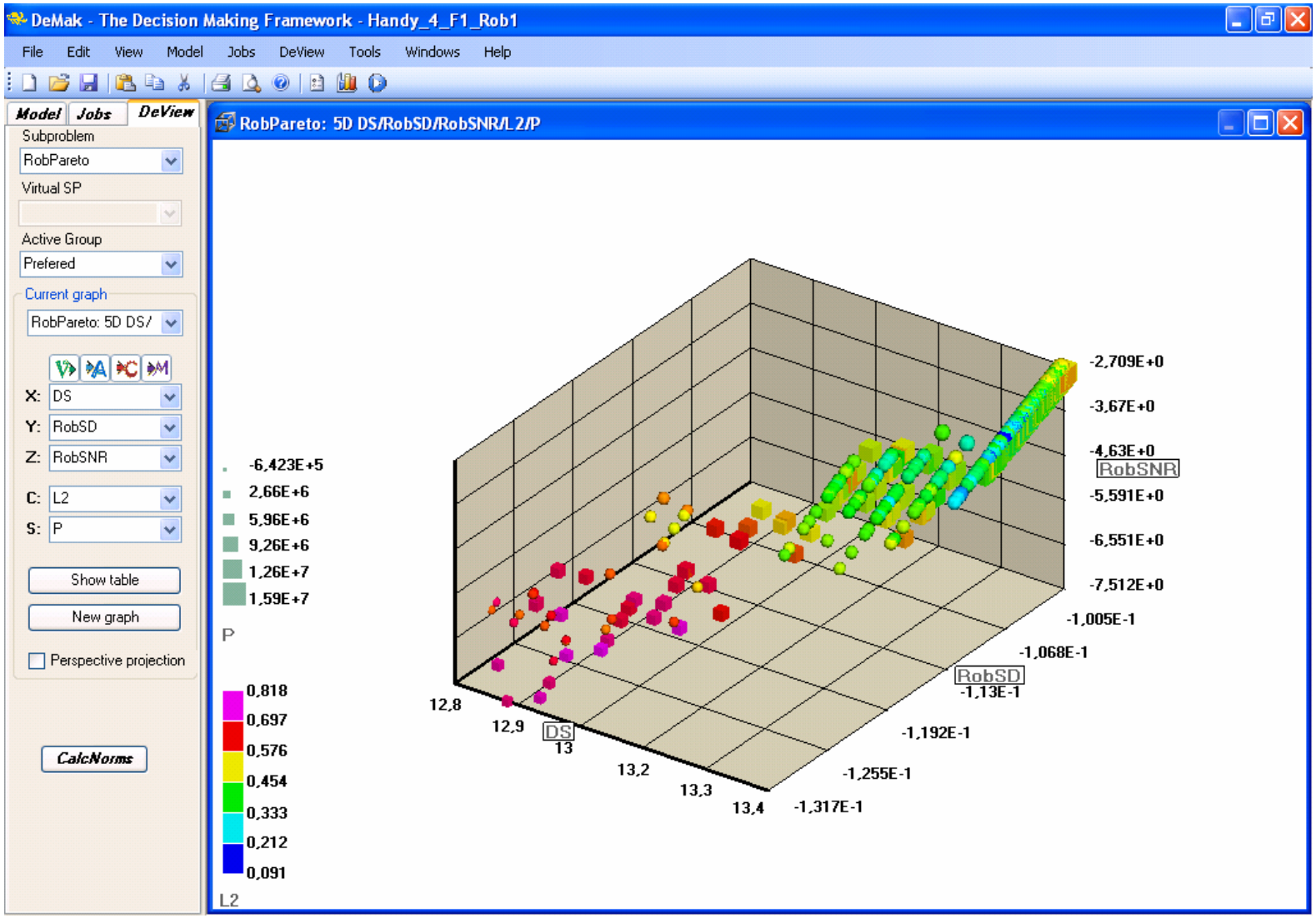
U slučaju analize robustnosti nedominiranih projekata Handymax bulk carrier-a koji su rezultat primjene izložene metodologije projektiranja trgovačkih brodova može se ponoviti završni komentar iz prethodnog primjera: provedena analiza robustnosti je potvrdila pretpostavku da projektna rješenja dobivena novom metodologijom pokazuju veću robustnost na varijacije utjecajnih ulaznih parametara.



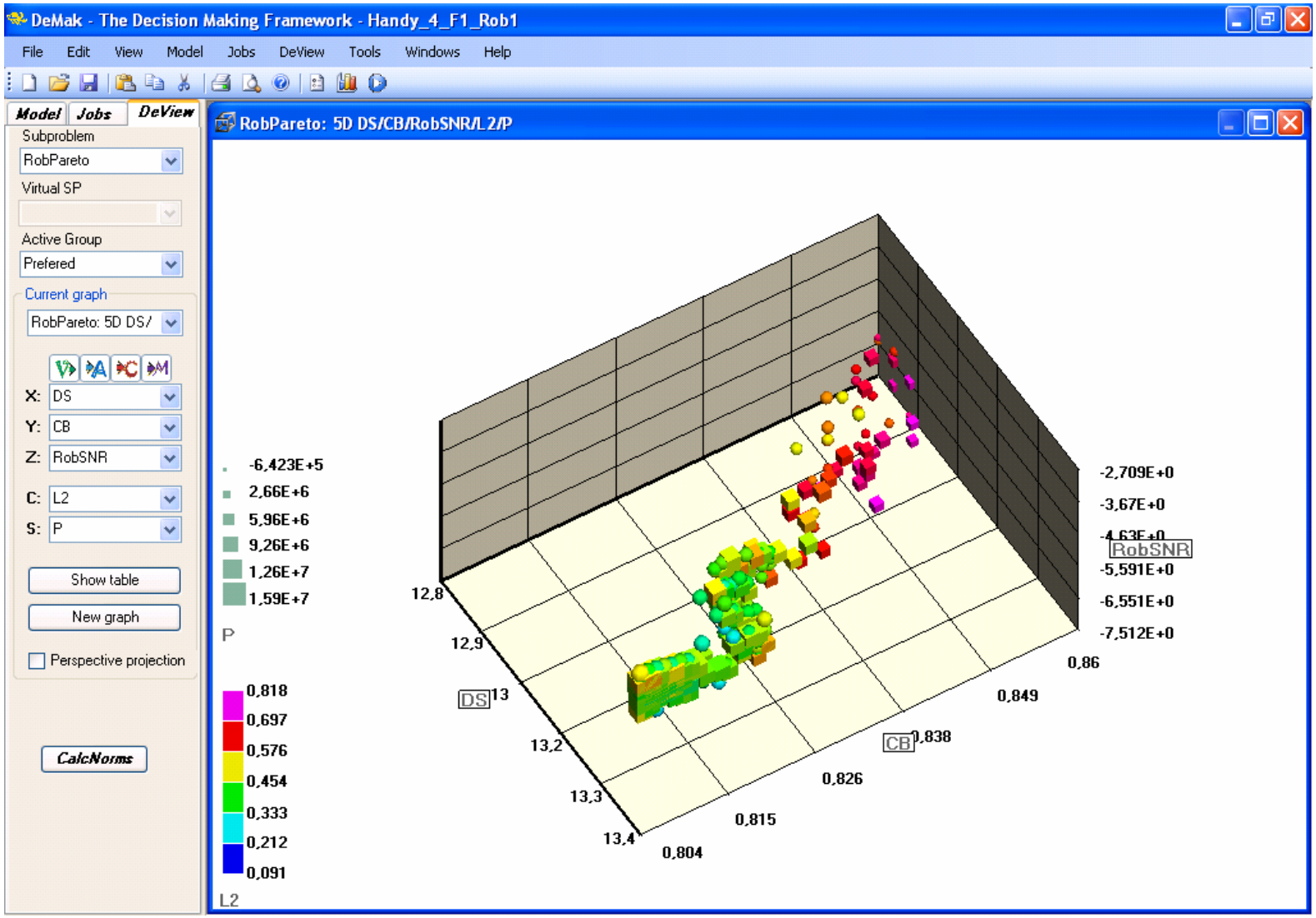

Slika 68 Nedominirani projekti Handymax bulk carrier-a u *SNR* – $\sigma$ – *P* – $v_{tr}$ prostoru s $L_2$ metrikom



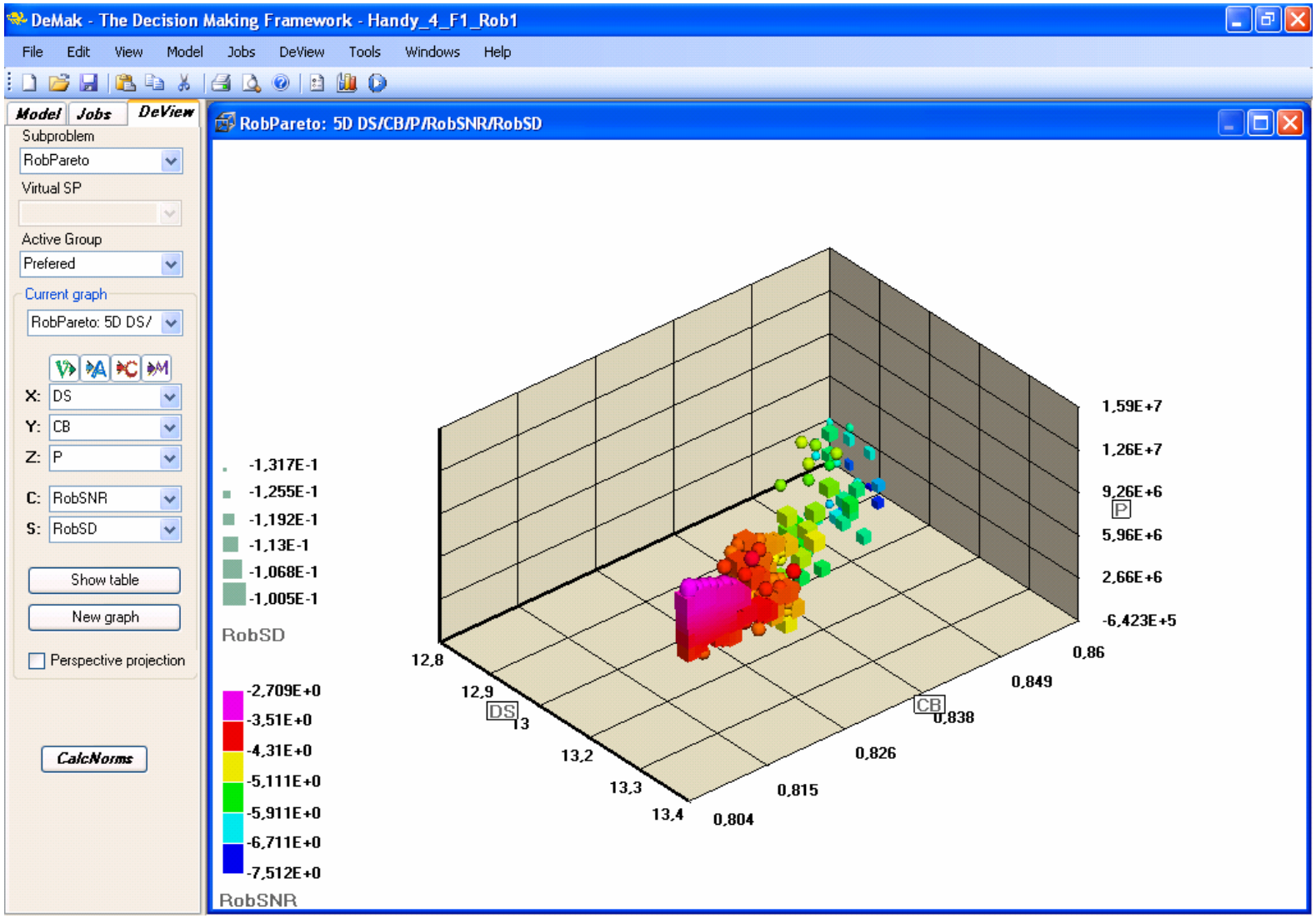

Slika 69 Nedominirani projekti Handymax bulk carrier-a u $v_{tr} - \sigma - SNR - P$ prostoru s $L_2$ metrikom



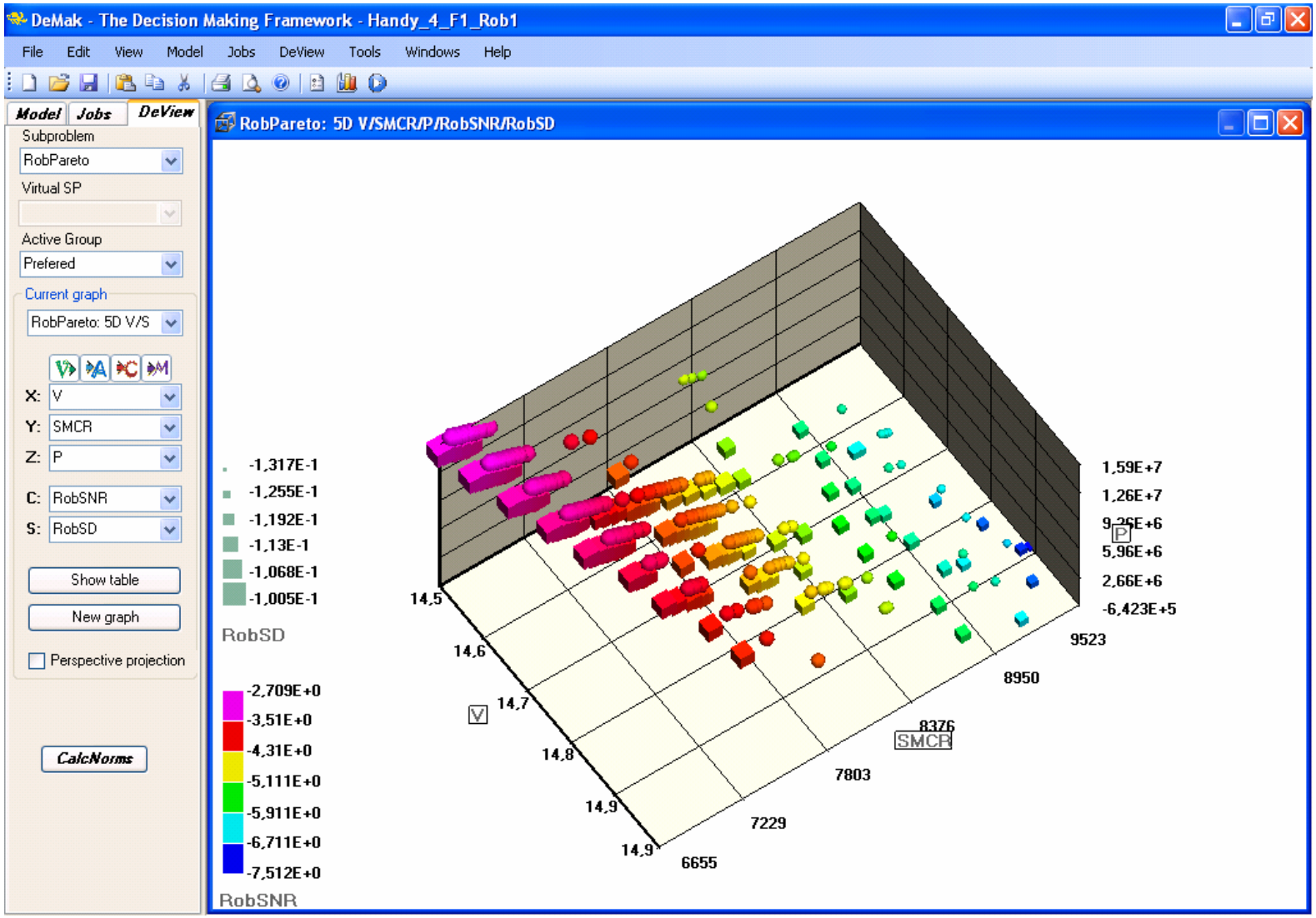

Slika 70 Nedominirani projekti Handymax bulk carrier-a u $d_s$ – $\sigma$ – *SNR* – *P* prostoru s $L_2$ metrikom




Slika 71 Nedominirani projekti Handymax bulk carrier-a u $d_s$ – $C_B$ – $SNR$ – $P$ prostoru s $L_2$ metrikom




Slika 72 Nedominirani projekti Handymax bulk carrier-a u $d_s$ – $C_B$ – $P$ – $SNR$ – $\sigma$ prostoru




Slika 73 Nedominirani projekti Handymax bulk carrier-a u $v_{tr}$ – *SMCR* – *P* – *SNR* – $\sigma$ prostoru

# 16 ZAKLJUČAK

U radu je prezentiran nov pristup optimiranju projekata trgovačkih brodova na temelju kojeg je razvijena nova metodologija i pripadni numerički algoritmi. Izložena metodologija omogućava objektivizirano donošenje odluke u postupku optimiranja projekta. Svim sudionicima u projektiranju, gradnji i eksploataciji broda je omogućeno sudjelovanje u procesu odlučivanja i izboru optimalnog projekta. Primjena nove metodologije i numeričkog algoritma omogućuje projektantima primjenu vlastitih ekspertnih znanja na kvalitetno višem nivou realizacija projekata.

Postignut je osnovni cilj rada - uvođenje nove metodologije projektiranja omogućava dosezanje više razine kvalitete projekata trgovačkih brodova. Potvrđena je hipoteza istraživanja, odnosno, dokazano je da je moguće proširiti Pareto frontu projektnih rješenja izvan područja suvremenih optimalnih brodova. To je postignuto na način da je proširen matematički model osnivanja broda, odnosno, model obuhvaća osnivanje, gradnju i eksploataciju broda. Tako generirani nedominirani projekti pokazali su znatno veću robustnost na promjene ulaznih nekontrolabilnih parametara.

Dokazano je da se troškovi eksploatacije broda mogu sniziti za 10-tak % (troškovi goriva za 20-25 %), što je daleko više od ušteda koje se mogu postići primjenom bilo kojih, do danas objavljenih, unapređenja projekta (kvalitete forme, podizanje stupnja djelovanja propulzijskog sustava, snižavanje težine optimiranjem čelične konstrukcije, itd.).

Objavljena metodologija je univerzalno primjenjiva kod osnivanja brodova za prijevoz sipkih tereta, tankera i ostalih tipova brodova sa srodnim osnovnim karakteristikama. Ostvarene su pretpostavke koje omogućuju kvalitetni skok u području optimiranja projekta broda, odnosno, generiranje optimalnih projekata veće tržišne i ekološke vrijednosti. 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.

Sugestija za daljnji razvoj nove metodologije projektiranja trgovačkih brodova ide u smjeru razvoja šire baze podataka i matematičkih modela osnivanja pojedinih tipova i veličina brodova. Mjesta za dogradnju izložene metodologije ima i u proširenju matematičkog modela eksploatacije broda na ostale načine poslovanja pomorskih kompanija i pojedinih brodova.

# LITERATURA

[1] WATSON, D.G.M., GILFILLAN, A.W.: Some Ship Design Methods, The Naval Architect 4(1976)6, 279-324.

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

[3] LAMB T., Editor: Ship Design and Construction, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Jersey City, 2003.

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

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

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

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

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

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

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

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

[12] 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.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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).

[16] ČUDINA, P.: Projektne procedure i matematički modeli u osnivanju brodova pune forme, Magistarski rad, Sveučilište u Zagrebu 2006.

[17] ČUDINA, P.: Design Procedure and Mathematical Models in the Concept Design of Tankers and Bulk Carriers, Brodogradnja 59(2008)4, 323-339.

[18] ŽANIĆ, V., ČUDINA, P.: Multiattribute Decision Making Methodology in the Concept Design of Tankers and Bulk Carriers, Brodogradnja 60(2009)1, 19-43.

[19] DIEZ M., PERI D.: Robust Optimization for Ship Conceptual Design, Ocean Engineering (2010), doi:10.1016/j.oceaneng.2010.03.010.

[20] LEVANDER, K.: Ship Design for Performance, Proceedings of IMPROVE Final Workshop, ASMG, Dubrovnik, 2009.

[21] STOPFORD, M.: Maritime Economics, 3rd edition, Routledge, London 2009.

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

[23] 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).

[24] PAVIĆ, D.: Pomorsko imovinsko pravo, Književni krug Split, Split 2006.

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

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

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

[28] ŽANIĆ, V., JANČIJEV T., ANDRIĆ, J.: Mathematical Models for Analysis and Optimization in Concept and Preliminary Ship Structural Design, IMAM 2000, Napulj 3:2, 15-23.

[29] ŽANIĆ, V.: Decision Support Methods, Proceedings of the 15th International Ship and Offshore Structures Congress, Vol. 1, Technical Committee IV.2 - Design Principles, Chapter 6; Mansour, A.E; Ertekin, R.C. (ed.), Elsevier Science, Amsterdam, 2003, 486-493.

[30] SUH P. N.: Principles of Design, Oxford University Press, New York, 1990.

[31] YU, PO-LUNG et al.: Multiple -Criteria Decision Making, Concepts, Techniques, and Extensions, Plenum Press, New York, 1985.

[32] KOCH, P. N., SIMPSON, T. W., ALLEN, J. K., MISTREE, F.: Statistical Approximations for Multidisciplinary Design Optimization: The Problem of Size, Journal of Aircraft, 1999, 36:1, 275-285.

[33] SEN, P.: Communicating Preferences in Multiple-criteria Decision-making: the Role of the Designer, Journal of Engineering Design, 2001, 12:1, 15-24.

[34] ŽANIĆ, V., JANČIJEV T., ANDRIĆ, J.: Structural Design and Analysis Methods for Large Passenger Ships, European Conference on Computational Mechanics, ECCM 1999, 908/9 + CD, 1-10.

[35] TAGUCHI, G.: On Robust Technology Development, ASMG Press, New York, 1993.

[36] MONTGOMERY, D. C.: Design and Analysis of Experiments, Third Edition, John Wiley and Sons Ltd, 1991.

[37] LEE, K-H., EOM I-S., PARK, G-J., LEE W-K.: Robust Design for Unconstrained Optimization Problems Using the Taguchi Method, AIAA Journal, 1996, 34:5, 1059-1063.

[38] SII H. S., RUXTON, T., WANG, A. J.: Taguchi Concepts and Their Applications in Marine and Offshore Safety Studies, Journal of Engineering Design, 2001, 12:4, 331-358.

[39] DU, X., CHEN, W.: Methodology for Managing the Effect of Uncertainty in Simulation –Based Design, AIAA Journal, 2000, 38:8, 1471-1478.

[40] VANDERPLAATS, G.N.: Structural Design Optimization Status and Direction, Journal of Aircraft, 1999, 36:1, 11-20.

[41] HAJELA, P.: Non-gradient Methods in Multidisciplinary Design Optimization-Status and Potential, Journal of Aircraft, 1999, 36:1, 255-265.

[42] PAPILA, M., HAFTKA, R. T.: Response Surface Approximations: Noise, Error Repair, and Modeling Errors, AIAA Journal 2000, 38:12, 2336-2343.

[43] JIN, R., CHEN, W., SIMPSON, T. W.: Comparative Studies of Meta-modeling Techniques under Multiple Modeling Criteria, Structural and Multidisciplinary Optimization, 2001, 23, 1-13.

[44] BATILL, S. M., STELMACK, M.A., SELLAR, R. S.: Framework for Multidisciplinary Design Based on Response-Surface Approximations, Journal of Aircraft, 1999, 36:1, 287-297.

[45] LEE, K-Y., CHO, S., ROTH, M-I.: An Efficient Global-local Hybrid Optimization Method Using Design Sensitivity Analysis, International Journal of Vehicle Design, 2002, 28:4, 300-317.

[46] ŽANIĆ, V., PREBEG, P.: DeMak dokumentacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.

[47] MICHALEWICZ, Z.: Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1992.

[48] YOO, J., HAJELA, P.: Fuzzy Multi-criterion Design Using Immune Network Simulation, Structural and Multidisciplinary Optimization, 2001, 22, 188-197.

[49] JANG, C. D., YOON, G. J.: Optimum Structural Design of Double Bulk Carriers in Comparison with Conventional Single Hull Types, IMDC 2000, 381-391.

[50] KURPATI, A., AZARM, S., WU, J.: Constraint Handling Improvements for Multi-objective Genetic Algorithms, Structural and Multidisciplinary Optimization, 2002, 23, 204-213.

[51] PIRIĆ, K., ŽANIĆ, V., PREBEG, P., ANDRIĆ, J.: Design Robustness of the Structural Solution Related to Various Fabrication and Operational Parameters, Proceedings of IMPROVE Final Workshop, ASMG, Dubrovnik, 2009.

[52] SUH P. N.: Axiomatic Design, Oxford University Press, New York, 2001.

[53] ROSS P. J.: Taguchi Techniques for Qality Engineering, McGraw-Hill, Int. 1988.

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

[55] OOSTERVELD, K.W.C., VAN OOSSANEN, P.: Further Computer-Analysed Data of the Wageningen B-Screw Series, N.S.M.B., Wageningen, 1975.

# STRUČNI IZVJEŠTAJI I DOKUMENTI

[D1] Clarkson Shipping Intelligence Weekly, Clarkson Research Services Ltd, London, 1998 – 2010.

[D2] Tečajna lista HNB, Hrvatska narodna banka, Zagreb, 2000 – 2010.

[D3] MEPS Steel International, MEPS International Ltd, Sheffield, 2001 – 2010.

# KRATKI ŽIVOTOPIS

Predrag Čudina je rođen 04.07.1956. godine u Splitu. U Splitu je pohađao osnovnu školu i klasičnu gimnaziju. Diplomirao je 1982. godine na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu i stekao zvanje diplomiranog inženjera brodogradnje. Na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu je 2006. godine završio poslijediplomski studij i stekao zvanje magistra znanosti.

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

Izradio je preko 300 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 izgrađeno četrdesetak novogradnji.

Od 1998. godine je član Tehničkog komiteta Lloyd's Register of Shipping-a, a u periodu od 2005. do 2008. godine je bio član Upravnog vijeća Hrvatskog registra brodova. Autor je većeg broja stručnih i znanstvenih članaka. Oženjen je i otac troje djece.

CURRICULUM VITAE

Predrag Čudina was born on 04.07.1956. in Split, Croatia, where he completed primary and high school education. On 1982. he graduated on the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb, Croatia as the Shipbuilding Dipl. Eng. On 2006. he finished the post graduation study on the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb as Master of Science.

From 1982. he is continuously working in Shipyard “Split”. During the period 1993. - 2002. he worked as Chief Ship Designer and Head of Ship Design Office. From 2002. to 2005. he was on the position of President of the Managing Board and C.E.O. of the Shipyard “Split”. Presently he is working as Head of Basic Design Department.

He has developed more than 300 designs of various ship types (tankers 2.000 - 170.000 dwt; bulk carriers 5.000 - 200.000 dwt; multipurpose vessels 5.000 - 22.000 dwt; reefer vessels 300.000 - 600.000 cu.ft; container carriers 1.000 - 4.000 TEU; RO-PAX-es, ferryboats, luxury yacht). Under his designs more than forty newbuildings have been constructed.

He is member of Lloyd’s Register of Shipping Technical Committee from 1998. He was member of Croatian Register of Shipping General Committee in the period 2003.-2007. He have published number of professional and scientific papers. He is married and he has three children.

# PRILOG 1: PRIBLIŽNI PRORAČUN MINIMALNOG NADVOĐA AFRAMAX TANKERA

Približni proračun minimalnog nadvođa (A) za konfiguraciju aframax tanker s kaštelom obuhvaća sljedeći postupak:

1. Duljinu broda za potrebe proračuna minimalnog nadvođa možemo približno odrediti kao duljinu među okomicama povećanu za 0.5 m, odnosno:

$$L_F = L_{pp} + 0.5 \text{ (m)} \tag{A1.1}$$

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

$$F_{tA} = 2903 + 6.5(L_F - 234) \text{ (mm)} \tag{A1.2}$$

3. Blok koeficijent na 0.85% visine broda na boku je aproksimiran sljedećim izrazom:

$$C_{B0.85D} = C_B\left[1 + 0.00726(0.85D - d_s)\right] \text{ (-)} \tag{A1.3}$$

4. Korekcija za blok koeficijent:

$$C_{CB} = \frac{C_{B0.85D} + 0.68}{1.36} \text{ (-)} \tag{A1.4}$$

5. Korekcija za visinu:

$$C_D = 250\left(D - \frac{L_F}{15} + 0.02\right) \text{ (mm)} \tag{A1.5}$$

6. Korekcija za palubni skok - uslijed pretpostavljenog preluka od 800 mm i duljinu kaštela od 10 m:

$$C_{sheer} = \left(0.75 - \frac{10}{2L_F}\right)\frac{200.1\left(\frac{L_F}{3} + 10\right) - 1200}{16} \text{ (mm)} \tag{A1.6}$$

7. Korekcija za kaštel

$$C_{for} = 1070\left(0.07\frac{10}{0.1L_F}\right) \text{ (mm)} \tag{A1.7}$$

8. Minimalno nadvođe:

$$F_A = C_{CB} F_{tA} + C_D + C_{sheer} - C_{for} \text{ (mm)} \tag{A1.8}$$

# PRILOG 2: REZULTAT POSTUPKA APROKSIMACIJE SNAGE PORIVNOG STROJA AFRAMAX TANKERA (IZLAZNA LISTA PROGRAMA POWERRA V1.0)

## AFRAMAX 114.000 DWT, MAIN ENGINE 6S60MC-C7

$$CSR = a_1 L_{pp}{}^{a2} B^{a3} d_s{}^{a4} C_B{}^{a5} v_{tr}{}^{a6} \left(1 + a_7 \frac{L_{pp}}{d_s}\right) \text{(kW)}$$

## KOEFICIJENTI FUNKCIJE REGRESIJE

$a_1$ = 5.207788329D-02

$a_2$ = -2.568722387D-01

$a_3$ = 9.852380765D-01

$a_4$ = 5.332486171D-01

$a_5$ = 2.266709966D+00

$a_6$ = 3.351378797D+00

$a_7$ = -5.159677006D-03

## STATISTIČKI POKAZATELJI

| | |
|---|---|
| Zbroj kvadrata odstupanja | 8.1022D+06 |
| Aritmetička sredina odstupanja | -3.598 |
| Standardna devijacija odstupanja | 167.981 |
| Prosječno postotno odstupanje | 1.344 |

## USPOREDBA TABELARNIH I IZRAČUNATIH VELIČINA

| Br. | $L_{pp}$ | B | $d_s$ | $C_B$ | $v_{tr}$ | CSR | APRX | CSR-APRX |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 235.0 | 43.0 | 15.4 | .832 | 14.60 | 10835.0 | 10856.9 | 21.9 |
| 2 | 235.0 | 43.0 | 15.4 | .832 | 14.90 | 11627.0 | 11622.8 | -4.2 |
| 3 | 235.0 | 43.0 | 15.4 | .832 | 15.20 | 12475.0 | 12425.8 | -49.2 |
| 4 | 235.0 | 43.0 | 15.4 | .836 | 14.60 | 11113.0 | 10975.6 | -137.4 |
| 5 | 235.0 | 43.0 | 15.4 | .836 | 14.90 | 11932.0 | 11749.8 | -182.2 |
| 6 | 235.0 | 43.0 | 15.4 | .836 | 15.20 | 12810.0 | 12561.6 | -248.4 |
| 7 | 240.0 | 41.0 | 15.8 | .832 | 14.60 | 10306.0 | 10449.3 | 143.3 |
| 8 | 240.0 | 41.0 | 15.8 | .832 | 14.90 | 11054.0 | 11186.4 | 132.4 |
| 9 | 240.0 | 41.0 | 15.8 | .832 | 15.20 | 11852.0 | 11959.3 | 107.3 |
| 10 | 240.0 | 41.0 | 15.8 | .836 | 14.60 | 10520.0 | 10563.5 | 43.5 |
| 11 | 240.0 | 41.0 | 15.8 | .836 | 14.90 | 11290.0 | 11308.7 | 18.7 |
| 12 | 240.0 | 41.0 | 15.8 | .836 | 15.20 | 12112.0 | 12090.0 | -22.0 |
| 13 | 240.0 | 42.0 | 15.4 | .836 | 14.60 | 10597.0 | 10646.8 | 49.8 |
| 14 | 240.0 | 42.0 | 15.4 | .836 | 14.90 | 11370.0 | 11397.9 | 27.9 |
| 15 | 240.0 | 42.0 | 15.4 | .836 | 15.20 | 12195.0 | 12185.3 | -9.7 |
| 16 | 240.0 | 42.0 | 15.8 | .812 | 14.60 | 9903.0 | 10126.1 | 223.1 |
| 17 | 240.0 | 42.0 | 15.8 | .812 | 14.90 | 10596.0 | 10840.5 | 244.5 |
| 18 | 240.0 | 42.0 | 15.8 | .812 | 15.20 | 11335.0 | 11589.4 | 254.4 |
| 19 | 240.0 | 42.0 | 15.8 | .816 | 14.60 | 10005.0 | 10239.6 | 234.6 |
| 20 | 240.0 | 42.0 | 15.8 | .816 | 14.90 | 10710.0 | 10961.9 | 251.9 |
| 21 | 240.0 | 42.0 | 15.8 | .816 | 15.20 | 11461.0 | 11719.2 | 258.2 |
| 22 | 240.0 | 43.0 | 15.0 | .836 | 14.60 | 10748.0 | 10719.6 | -28.4 |
| 23 | 240.0 | 43.0 | 15.0 | .836 | 14.90 | 11531.0 | 11475.8 | -55.2 |
| 24 | 240.0 | 43.0 | 15.0 | .836 | 15.20 | 12366.0 | 12268.7 | -97.3 |
| 25 | 240.0 | 43.0 | 15.4 | .816 | 14.60 | 10077.0 | 10314.6 | 237.6 |
| 26 | 240.0 | 43.0 | 15.4 | .816 | 14.90 | 10785.0 | 11042.2 | 257.2 |
| 27 | 240.0 | 43.0 | 15.4 | .816 | 15.20 | 11540.0 | 11805.1 | 265.1 |
| 28 | 240.0 | 43.0 | 15.8 | .796 | 14.60 | 9697.0 | 9906.5 | 209.5 |
| 29 | 240.0 | 43.0 | 15.8 | .796 | 14.90 | 10360.0 | 10605.4 | 245.4 |
| 30 | 240.0 | 43.0 | 15.8 | .796 | 15.20 | 11065.0 | 11338.1 | 273.1 |
| 31 | 240.0 | 44.0 | 15.0 | .820 | 14.60 | 10333.0 | 10495.3 | 162.3 |
| 32 | 240.0 | 44.0 | 15.0 | .820 | 14.90 | 11063.0 | 11235.6 | 172.6 |
| 33 | 240.0 | 44.0 | 15.0 | .820 | 15.20 | 11841.0 | 12011.9 | 170.9 |
| 34 | 240.0 | 44.0 | 15.4 | .796 | 14.60 | 9763.0 | 9973.8 | 210.8 |
| 35 | 240.0 | 44.0 | 15.4 | .796 | 14.90 | 10429.0 | 10677.3 | 248.3 |
| 36 | 240.0 | 44.0 | 15.4 | .796 | 15.20 | 11136.0 | 11415.0 | 279.0 |
| 37 | 240.0 | 44.0 | 15.4 | .800 | 14.60 | 9937.0 | 10087.7 | 150.7 |
| 38 | 240.0 | 44.0 | 15.4 | .800 | 14.90 | 10619.0 | 10799.4 | 180.4 |
| 39 | 240.0 | 44.0 | 15.4 | .800 | 15.20 | 11345.0 | 11545.5 | 200.5 |
| 40 | 240.0 | 44.0 | 15.8 | .780 | 14.60 | 9599.0 | 9677.6 | 78.6 |
| 41 | 240.0 | 44.0 | 15.8 | .780 | 14.90 | 10244.0 | 10360.3 | 116.3 |
| 42 | 240.0 | 44.0 | 15.8 | .780 | 15.20 | 10929.0 | 11076.1 | 147.1 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 43 | 245.0 | 40.0 | 15.8 | .836 | 14.60 | 10182.0 | 10237.0 | 55.0 |
| 44 | 245.0 | 40.0 | 15.8 | .836 | 14.90 | 10919.0 | 10959.1 | 40.1 |
| 45 | 245.0 | 40.0 | 15.8 | .836 | 15.20 | 11705.0 | 11716.3 | 11.3 |
| 46 | 245.0 | 41.0 | 15.4 | .836 | 14.60 | 10258.0 | 10323.3 | 65.3 |
| 47 | 245.0 | 41.0 | 15.4 | .836 | 14.90 | 10999.0 | 11051.5 | 52.5 |
| 48 | 245.0 | 41.0 | 15.4 | .836 | 15.20 | 11789.0 | 11815.0 | 26.0 |
| 49 | 245.0 | 41.0 | 15.8 | .816 | 14.60 | 9685.0 | 9928.9 | 243.9 |
| 50 | 245.0 | 41.0 | 15.8 | .816 | 14.90 | 10360.0 | 10629.3 | 269.3 |
| 51 | 245.0 | 41.0 | 15.8 | .816 | 15.20 | 11078.0 | 11363.7 | 285.7 |
| 52 | 245.0 | 41.0 | 15.8 | .820 | 14.60 | 9892.0 | 10039.5 | 147.5 |
| 53 | 245.0 | 41.0 | 15.8 | .820 | 14.90 | 10586.0 | 10747.8 | 161.8 |
| 54 | 245.0 | 41.0 | 15.8 | .820 | 15.20 | 11326.0 | 11490.3 | 164.3 |
| 55 | 245.0 | 41.0 | 16.2 | .796 | 14.60 | 9377.0 | 9532.2 | 155.2 |
| 56 | 245.0 | 41.0 | 16.2 | .796 | 14.90 | 10013.0 | 10204.6 | 191.6 |
| 57 | 245.0 | 41.0 | 16.2 | .796 | 15.20 | 10688.0 | 10909.7 | 221.7 |
| 58 | 245.0 | 41.0 | 16.2 | .800 | 14.60 | 9449.0 | 9641.1 | 192.1 |
| 59 | 245.0 | 41.0 | 16.2 | .800 | 14.90 | 10093.0 | 10321.2 | 228.2 |
| 60 | 245.0 | 41.0 | 16.2 | .800 | 15.20 | 10777.0 | 11034.3 | 257.3 |
| 61 | 245.0 | 42.0 | 15.4 | .816 | 14.60 | 9750.0 | 10006.7 | 256.7 |
| 62 | 245.0 | 42.0 | 15.4 | .816 | 14.90 | 10429.0 | 10712.6 | 283.6 |
| 63 | 245.0 | 42.0 | 15.4 | .816 | 15.20 | 11151.0 | 11452.7 | 301.7 |
| 64 | 245.0 | 42.0 | 15.4 | .820 | 14.60 | 9963.0 | 10118.2 | 155.2 |
| 65 | 245.0 | 42.0 | 15.4 | .820 | 14.90 | 10660.0 | 10832.0 | 172.0 |
| 66 | 245.0 | 42.0 | 15.4 | .820 | 15.20 | 11403.0 | 11580.4 | 177.4 |
| 67 | 245.0 | 42.0 | 15.8 | .796 | 14.60 | 9435.0 | 9611.3 | 176.3 |
| 68 | 245.0 | 42.0 | 15.8 | .796 | 14.90 | 10073.0 | 10289.3 | 216.3 |
| 69 | 245.0 | 42.0 | 15.8 | .796 | 15.20 | 10751.0 | 11000.2 | 249.2 |
| 70 | 245.0 | 42.0 | 15.8 | .800 | 14.60 | 9582.0 | 9721.1 | 139.1 |
| 71 | 245.0 | 42.0 | 15.8 | .800 | 14.90 | 10234.0 | 10406.9 | 172.9 |
| 72 | 245.0 | 42.0 | 15.8 | .800 | 15.20 | 10926.0 | 11125.9 | 199.9 |
| 73 | 245.0 | 42.0 | 16.2 | .780 | 14.60 | 9285.0 | 9322.1 | 37.1 |
| 74 | 245.0 | 42.0 | 16.2 | .780 | 14.90 | 9903.0 | 9979.7 | 76.7 |
| 75 | 245.0 | 42.0 | 16.2 | .780 | 15.20 | 10559.0 | 10669.2 | 110.2 |
| 76 | 245.0 | 43.0 | 15.0 | .820 | 14.60 | 10037.0 | 10186.9 | 149.9 |
| 77 | 245.0 | 43.0 | 15.0 | .820 | 14.90 | 10739.0 | 10905.5 | 166.5 |
| 78 | 245.0 | 43.0 | 15.0 | .820 | 15.20 | 11484.0 | 11658.9 | 174.9 |
| 79 | 245.0 | 43.0 | 15.0 | .824 | 14.60 | 10218.0 | 10299.9 | 81.9 |
| 80 | 245.0 | 43.0 | 15.0 | .824 | 14.90 | 10937.0 | 11026.4 | 89.4 |
| 81 | 245.0 | 43.0 | 15.0 | .824 | 15.20 | 11703.0 | 11788.3 | 85.3 |
| 82 | 245.0 | 43.0 | 15.4 | .800 | 14.60 | 9645.0 | 9791.8 | 146.8 |
| 83 | 245.0 | 43.0 | 15.4 | .800 | 14.90 | 10300.0 | 10482.6 | 182.6 |
| 84 | 245.0 | 43.0 | 15.4 | .800 | 15.20 | 10995.0 | 11206.8 | 211.8 |
| 85 | 245.0 | 43.0 | 15.8 | .780 | 14.60 | 9414.0 | 9394.2 | -19.8 |
| 86 | 245.0 | 43.0 | 15.8 | .780 | 14.90 | 10039.0 | 10056.9 | 17.9 |
| 87 | 245.0 | 43.0 | 15.8 | .780 | 15.20 | 10703.0 | 10751.8 | 48.8 |
| 88 | 245.0 | 44.0 | 15.0 | .800 | 14.60 | 9712.0 | 9853.0 | 141.0 |
| 89 | 245.0 | 44.0 | 15.0 | .800 | 14.90 | 10370.0 | 10548.1 | 178.1 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 90 | 245.0 | 44.0 | 15.0 | .800 | 15.20 | 11069.0 | 11276.9 | 207.9 |
| 91 | 245.0 | 44.0 | 15.0 | .804 | 14.60 | 9863.0 | 9965.1 | 102.1 |
| 92 | 245.0 | 44.0 | 15.0 | .804 | 14.90 | 10535.0 | 10668.0 | 133.0 |
| 93 | 245.0 | 44.0 | 15.0 | .804 | 15.20 | 11249.0 | 11405.1 | 156.1 |
| 94 | 245.0 | 44.0 | 15.4 | .780 | 14.60 | 9473.0 | 9457.5 | -15.5 |
| 95 | 245.0 | 44.0 | 15.4 | .780 | 14.90 | 10101.0 | 10124.7 | 23.7 |
| 96 | 245.0 | 44.0 | 15.4 | .780 | 15.20 | 10767.0 | 10824.2 | 57.2 |
| 97 | 245.0 | 44.0 | 15.4 | .784 | 14.60 | 9598.0 | 9567.8 | -30.2 |
| 98 | 245.0 | 44.0 | 15.4 | .784 | 14.90 | 10238.0 | 10242.8 | 4.8 |
| 99 | 245.0 | 44.0 | 15.4 | .784 | 15.20 | 10915.0 | 10950.4 | 35.4 |
| 100 | 245.0 | 45.0 | 15.0 | .784 | 14.60 | 9666.0 | 9622.7 | -43.3 |
| 101 | 245.0 | 45.0 | 15.0 | .784 | 14.90 | 10308.0 | 10301.5 | -6.5 |
| 102 | 245.0 | 45.0 | 15.0 | .784 | 15.20 | 10989.0 | 11013.3 | 24.3 |
| 103 | 250.0 | 40.0 | 15.8 | .820 | 14.60 | 9610.0 | 9730.2 | 120.2 |
| 104 | 250.0 | 40.0 | 15.8 | .820 | 14.90 | 10279.0 | 10416.6 | 137.6 |
| 105 | 250.0 | 40.0 | 15.8 | .820 | 15.20 | 10988.0 | 11136.3 | 148.3 |
| 106 | 250.0 | 40.0 | 15.8 | .824 | 14.60 | 9702.0 | 9838.1 | 136.1 |
| 107 | 250.0 | 40.0 | 15.8 | .824 | 14.90 | 10380.0 | 10532.2 | 152.2 |
| 108 | 250.0 | 40.0 | 15.8 | .824 | 15.20 | 11102.0 | 11259.8 | 157.8 |
| 109 | 250.0 | 41.0 | 15.4 | .820 | 14.60 | 9674.0 | 9811.7 | 137.7 |
| 110 | 250.0 | 41.0 | 15.4 | .820 | 14.90 | 10345.0 | 10503.9 | 158.9 |
| 111 | 250.0 | 41.0 | 15.4 | .820 | 15.20 | 11059.0 | 11229.6 | 170.6 |
| 112 | 250.0 | 41.0 | 15.4 | .824 | 14.60 | 9841.0 | 9920.6 | 79.6 |
| 113 | 250.0 | 41.0 | 15.4 | .824 | 14.90 | 10528.0 | 10620.4 | 92.4 |
| 114 | 250.0 | 41.0 | 15.4 | .824 | 15.20 | 11260.0 | 11354.2 | 94.2 |
| 115 | 250.0 | 41.0 | 15.8 | .800 | 14.60 | 9377.0 | 9427.2 | 50.2 |
| 116 | 250.0 | 41.0 | 15.8 | .800 | 14.90 | 10009.0 | 10092.2 | 83.2 |
| 117 | 250.0 | 41.0 | 15.8 | .800 | 15.20 | 10679.0 | 10789.4 | 110.4 |
| 118 | 250.0 | 41.0 | 15.8 | .804 | 14.60 | 9441.0 | 9534.3 | 93.3 |
| 119 | 250.0 | 41.0 | 15.8 | .804 | 14.90 | 10080.0 | 10206.9 | 126.9 |
| 120 | 250.0 | 41.0 | 15.8 | .804 | 15.20 | 10759.0 | 10912.1 | 153.1 |
| 121 | 250.0 | 41.0 | 16.2 | .780 | 14.60 | 9112.0 | 9040.6 | -71.4 |
| 122 | 250.0 | 41.0 | 16.2 | .780 | 14.90 | 9712.0 | 9678.4 | -33.6 |
| 123 | 250.0 | 41.0 | 16.2 | .780 | 15.20 | 10348.0 | 10347.1 | -.9 |
| 124 | 250.0 | 41.0 | 16.2 | .784 | 14.60 | 9226.0 | 9146.1 | -79.9 |
| 125 | 250.0 | 41.0 | 16.2 | .784 | 14.90 | 9837.0 | 9791.3 | -45.7 |
| 126 | 250.0 | 41.0 | 16.2 | .784 | 15.20 | 10484.0 | 10467.7 | -16.3 |
| 127 | 250.0 | 42.0 | 15.0 | .824 | 14.60 | 9912.0 | 9992.9 | 80.9 |
| 128 | 250.0 | 42.0 | 15.0 | .824 | 14.90 | 10602.0 | 10697.9 | 95.9 |
| 129 | 250.0 | 42.0 | 15.0 | .824 | 15.20 | 11337.0 | 11437.0 | 100.0 |
| 130 | 250.0 | 42.0 | 15.4 | .800 | 14.60 | 9437.0 | 9500.6 | 63.6 |
| 131 | 250.0 | 42.0 | 15.4 | .800 | 14.90 | 10071.0 | 10170.8 | 99.8 |
| 132 | 250.0 | 42.0 | 15.4 | .800 | 15.20 | 10744.0 | 10873.4 | 129.4 |
| 133 | 250.0 | 42.0 | 15.4 | .804 | 14.60 | 9577.0 | 9608.6 | 31.6 |
| 134 | 250.0 | 42.0 | 15.4 | .804 | 14.90 | 10225.0 | 10286.4 | 61.4 |
| 135 | 250.0 | 42.0 | 15.4 | .804 | 15.20 | 10911.0 | 10997.1 | 86.1 |
| 136 | 250.0 | 42.0 | 15.8 | .780 | 14.60 | 9237.0 | 9115.2 | -121.8 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 137 | 250.0 | 42.0 | 15.8 | .780 | 14.90 | 9845.0 | 9758.3 | -86.7 |
| 138 | 250.0 | 42.0 | 15.8 | .780 | 15.20 | 10488.0 | 10432.5 | -55.5 |
| 139 | 250.0 | 42.0 | 15.8 | .784 | 14.60 | 9355.0 | 9221.5 | -133.5 |
| 140 | 250.0 | 42.0 | 15.8 | .784 | 14.90 | 9973.0 | 9872.1 | -100.9 |
| 141 | 250.0 | 42.0 | 15.8 | .784 | 15.20 | 10628.0 | 10554.1 | -73.9 |
| 142 | 250.0 | 43.0 | 15.0 | .804 | 14.60 | 9642.0 | 9673.3 | 31.3 |
| 143 | 250.0 | 43.0 | 15.0 | .804 | 14.90 | 10292.0 | 10355.6 | 63.6 |
| 144 | 250.0 | 43.0 | 15.0 | .804 | 15.20 | 10983.0 | 11071.1 | 88.1 |
| 145 | 250.0 | 43.0 | 15.4 | .784 | 14.60 | 9416.0 | 9288.2 | -127.8 |
| 146 | 250.0 | 43.0 | 15.4 | .784 | 14.90 | 10038.0 | 9943.4 | -94.6 |
| 147 | 250.0 | 43.0 | 15.4 | .784 | 15.20 | 10695.0 | 10630.4 | -64.6 |
| 148 | 250.0 | 44.0 | 15.0 | .784 | 14.60 | 9480.0 | 9345.7 | -134.3 |
| 149 | 250.0 | 44.0 | 15.0 | .784 | 14.90 | 10103.0 | 10005.0 | -98.0 |
| 150 | 250.0 | 44.0 | 15.0 | .784 | 15.20 | 10764.0 | 10696.2 | -67.8 |
| 151 | 250.0 | 44.0 | 15.0 | .788 | 14.60 | 9606.0 | 9454.1 | -151.9 |
| 152 | 250.0 | 44.0 | 15.0 | .788 | 14.90 | 10241.0 | 10121.1 | -119.9 |
| 153 | 250.0 | 44.0 | 15.0 | .788 | 15.20 | 10914.0 | 10820.3 | -93.7 |
| 154 | 255.0 | 40.0 | 15.4 | .824 | 14.60 | 9605.0 | 9615.4 | 10.4 |
| 155 | 255.0 | 40.0 | 15.4 | .824 | 14.90 | 10270.0 | 10293.7 | 23.7 |
| 156 | 255.0 | 40.0 | 15.4 | .824 | 15.20 | 10976.0 | 11004.9 | 28.9 |
| 157 | 255.0 | 40.0 | 15.4 | .828 | 14.60 | 9694.0 | 9721.5 | 27.5 |
| 158 | 255.0 | 40.0 | 15.4 | .828 | 14.90 | 10369.0 | 10407.3 | 38.3 |
| 159 | 255.0 | 40.0 | 15.4 | .828 | 15.20 | 11087.0 | 11126.3 | 39.3 |
| 160 | 255.0 | 40.0 | 15.8 | .804 | 14.60 | 9246.0 | 9241.5 | -4.5 |
| 161 | 255.0 | 40.0 | 15.8 | .804 | 14.90 | 9868.0 | 9893.4 | 25.4 |
| 162 | 255.0 | 40.0 | 15.8 | .804 | 15.20 | 10526.0 | 10577.0 | 51.0 |
| 163 | 255.0 | 40.0 | 15.8 | .808 | 14.60 | 9380.0 | 9346.1 | -33.9 |
| 164 | 255.0 | 40.0 | 15.8 | .808 | 14.90 | 10014.0 | 10005.4 | -8.6 |
| 165 | 255.0 | 40.0 | 15.8 | .808 | 15.20 | 10686.0 | 10696.6 | 10.6 |
| 166 | 255.0 | 41.0 | 15.0 | .828 | 14.60 | 9763.0 | 9797.6 | 34.6 |
| 167 | 255.0 | 41.0 | 15.0 | .828 | 14.90 | 10441.0 | 10488.8 | 47.8 |
| 168 | 255.0 | 41.0 | 15.0 | .828 | 15.20 | 11163.0 | 11213.5 | 50.5 |
| 169 | 255.0 | 41.0 | 15.4 | .804 | 14.60 | 9307.0 | 9318.5 | 11.5 |
| 170 | 255.0 | 41.0 | 15.4 | .804 | 14.90 | 9931.0 | 9975.8 | 44.8 |
| 171 | 255.0 | 41.0 | 15.4 | .804 | 15.20 | 10592.0 | 10665.0 | 73.0 |
| 172 | 255.0 | 41.0 | 15.4 | .808 | 14.60 | 9440.0 | 9423.9 | -16.1 |
| 173 | 255.0 | 41.0 | 15.4 | .808 | 14.90 | 10077.0 | 10088.7 | 11.7 |
| 174 | 255.0 | 41.0 | 15.4 | .808 | 15.20 | 10752.0 | 10785.7 | 33.7 |
| 175 | 255.0 | 41.0 | 15.8 | .784 | 14.60 | 9183.0 | 8943.6 | -239.4 |
| 176 | 255.0 | 41.0 | 15.8 | .784 | 14.90 | 9785.0 | 9574.5 | -210.5 |
| 177 | 255.0 | 41.0 | 15.8 | .784 | 15.20 | 10422.0 | 10236.0 | -186.0 |
| 178 | 255.0 | 41.0 | 15.8 | .788 | 14.60 | 9228.0 | 9047.3 | -180.7 |
| 179 | 255.0 | 41.0 | 15.8 | .788 | 14.90 | 9837.0 | 9685.6 | -151.4 |
| 180 | 255.0 | 41.0 | 15.8 | .788 | 15.20 | 10480.0 | 10354.7 | -125.3 |
| 181 | 255.0 | 42.0 | 15.0 | .808 | 14.60 | 9505.0 | 9492.1 | -12.9 |
| 182 | 255.0 | 42.0 | 15.0 | .808 | 14.90 | 10144.0 | 10161.7 | 17.7 |
| 183 | 255.0 | 42.0 | 15.0 | .808 | 15.20 | 10822.0 | 10863.8 | 41.8 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 184 | 255.0 | 42.0 | 15.4 | .784 | 14.60 | 9240.0 | 9012.8 | -227.2 |
| 185 | 255.0 | 42.0 | 15.4 | .784 | 14.90 | 9845.0 | 9648.5 | -196.5 |
| 186 | 255.0 | 42.0 | 15.4 | .784 | 15.20 | 10484.0 | 10315.1 | -168.9 |
| 187 | 255.0 | 42.0 | 15.4 | .788 | 14.60 | 9360.0 | 9117.3 | -242.7 |
| 188 | 255.0 | 42.0 | 15.4 | .788 | 14.90 | 9975.0 | 9760.5 | -214.5 |
| 189 | 255.0 | 42.0 | 15.4 | .788 | 15.20 | 10626.0 | 10434.8 | -191.2 |
| 190 | 255.0 | 43.0 | 15.0 | .788 | 14.60 | 9424.0 | 9178.2 | -245.8 |
| 191 | 255.0 | 43.0 | 15.0 | .788 | 14.90 | 10043.0 | 9825.7 | -217.3 |
| 192 | 255.0 | 43.0 | 15.0 | .788 | 15.20 | 10696.0 | 10504.5 | -191.5 |
| 193 | 260.0 | 40.0 | 15.4 | .808 | 14.60 | 9042.0 | 9134.9 | 92.9 |
| 194 | 260.0 | 40.0 | 15.4 | .808 | 14.90 | 9647.0 | 9779.3 | 132.3 |
| 195 | 260.0 | 40.0 | 15.4 | .808 | 15.20 | 10287.0 | 10454.9 | 167.9 |
| 196 | 260.0 | 40.0 | 15.4 | .812 | 14.60 | 9175.0 | 9237.7 | 62.7 |
| 197 | 260.0 | 40.0 | 15.4 | .812 | 14.90 | 9792.0 | 9889.3 | 97.3 |
| 198 | 260.0 | 40.0 | 15.4 | .812 | 15.20 | 10445.0 | 10572.6 | 127.6 |
| 199 | 260.0 | 40.0 | 15.8 | .788 | 14.60 | 9056.0 | 8770.3 | -285.7 |
| 200 | 260.0 | 40.0 | 15.8 | .788 | 14.90 | 9648.0 | 9389.0 | -259.0 |
| 201 | 260.0 | 40.0 | 15.8 | .788 | 15.20 | 10273.0 | 10037.7 | -235.3 |
| 202 | 260.0 | 40.0 | 15.8 | .792 | 14.60 | 9176.0 | 8871.5 | -304.5 |
| 203 | 260.0 | 40.0 | 15.8 | .792 | 14.90 | 9779.0 | 9497.4 | -281.6 |
| 204 | 260.0 | 40.0 | 15.8 | .792 | 15.20 | 10417.0 | 10153.5 | -263.5 |
| 205 | 260.0 | 41.0 | 15.4 | .788 | 14.60 | 9188.0 | 8842.9 | -345.1 |
| 206 | 260.0 | 41.0 | 15.4 | .788 | 14.90 | 9788.0 | 9466.7 | -321.3 |
| 207 | 260.0 | 41.0 | 15.4 | .788 | 15.20 | 10421.0 | 10120.7 | -300.3 |
| 208 | 260.0 | 41.0 | 15.4 | .792 | 14.60 | 9234.0 | 8945.0 | -289.0 |
| 209 | 260.0 | 41.0 | 15.4 | .792 | 14.90 | 9873.0 | 9576.0 | -297.0 |
| 210 | 260.0 | 41.0 | 15.4 | .792 | 15.20 | 10515.0 | 10237.6 | -277.4 |

# PRILOG 3: PRIBLIŽNI PRORAČUN MINIMALNOG NADVOĐA HANDYMAX BULK CARRIER-A

Približni proračun minimalnog nadvođa (B-60) za konfiguraciju handymax bulk carrier s kaštelom obuhvaća sljedeći postupak:

1. Duljinu broda za potrebe proračuna minimalnog nadvođa možemo približno odrediti kao duljinu među okomicama povećanu za 0.5 m, odnosno:

$$L_F = L_{pp} + 0.5 \text{ (m)} \tag{A3.1}$$

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

$$F_{tB} = 2915 + 18.25(L_F - 180) \text{ (mm)} \tag{A3.2}$$

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

$$F_{tA} = 2393 + 11.75(L_F - 180) \text{ (mm)} \tag{A3.3}$$

4. Sniženo tablično nadvođe B-60 je definirano kao:

$$F_{tB-60} = F_{tB} - 0.6(F_{tB} - F_{tA}) \text{ (mm)} \tag{A3.4}$$

5. Blok koeficijent na 0.85% visine broda na boku je aproksimiran sljedećim izrazom:

$$C_{B0.85D} = C_B\left[1 + 0.00837(0.85D - d_s)\right] \text{ (-)} \tag{A3.5}$$

6. Korekcija za blok koeficijent:

$$C_{CB} = \frac{C_{B0.85D} + 0.68}{1.36} \text{ (-)} \tag{A3.6}$$

7. Korekcija za visinu:

$$C_D = 250\left(D - \frac{L_F}{15} + 0.02\right) \text{ (mm)} \tag{A3.7}$$

8. Korekcija za palubni skok - uslijed pretpostavljenog preluka od 500 mm i duljinu kaštela od 10 m:

$$C_{sheer} = \left(0.75 - \frac{10}{2L_F}\right)\frac{200.1\left(\frac{L_F}{3} + 10\right) - 700}{16} \text{ (mm)} \tag{A3.8}$$

9. Korekcija za kaštel:

$$C_{for} = 1070\left[\left(0.05\frac{10}{0.1L_F}\right):\left(5\frac{0.07L_F - 10}{0.07L_F}\right)\right] \text{ (mm)} \qquad \text{(A3.9)}$$

10. Minimalno nadvođe tipa B-60:

$$F_B = C_{CB}F_{tB-60} + C_D + C_{sheer} - C_{for} \text{ (mm)} \qquad \text{(A3.10)}$$

# PRILOG 4: REZULTAT POSTUPKA APROKSIMACIJE SNAGE PORIVNOG STROJA HANDYMAX BULKERA (IZLAZNA LISTA PROGRAMA POWERRA V1.0)

## HANDYMAX BULK CARRIER 55.000 DWT, MAIN ENGINE 6S50MC-C7

$$CSR = a_1 L_{pp}{}^{a2} B^{a3} d_s{}^{a4} C_B{}^{a5} v_{tr}{}^{a6} \left(1 + a_7 \frac{L_{pp}}{d_s}\right) \text{(kW)}$$

## KOEFICIJENTI FUNKCIJE REGRESIJE

$a_1$ = 8.627533383D-03

$a_2$ = -3.523881313D-01

$a_3$ = 1.262280048D+00

$a_4$ = 4.176911220D-01

$a_5$ = 4.291784764D+00

$a_6$ = 4.088106114D+00

$a_7$ = -1.097514767D-02

## STATISTIČKI POKAZATELJI

| | |
|---|---|
| Zbroj kvadrata odstupanja | 6.1263D+05 |
| Aritmetička sredina odstupanja | 5.473 |
| Standardna devijacija odstupanja | 67.392 |
| Prosječno postotno odstupanje | .712 |

## USPOREDBA TABELARNIH I IZRAČUNATIH VELIČINA

| Br. | $L_{pp}$ | B | $d_s$ | $C_B$ | $v_{tr}$ | CSR | APRX | CSR-APRX |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 180.0 | 32.0 | 13.0 | .850 | 14.50 | 7697.0 | 7579.7 | -117.3 |
| 2 | 180.0 | 32.0 | 13.0 | .850 | 14.80 | 8373.0 | 8241.6 | -131.4 |
| 3 | 180.0 | 32.0 | 13.0 | .850 | 15.10 | 9110.0 | 8946.2 | -163.8 |
| 4 | 180.0 | 32.0 | 13.2 | .835 | 14.50 | 7085.0 | 7086.2 | 1.2 |
| 5 | 180.0 | 32.0 | 13.2 | .835 | 14.80 | 7687.0 | 7705.0 | 18.0 |
| 6 | 180.0 | 32.0 | 13.2 | .835 | 15.10 | 8341.0 | 8363.7 | 22.7 |
| 7 | 180.0 | 32.0 | 13.2 | .840 | 14.50 | 7280.0 | 7270.1 | -9.9 |
| 8 | 180.0 | 32.0 | 13.2 | .840 | 14.80 | 7905.0 | 7904.9 | -0.1 |
| 9 | 180.0 | 32.0 | 13.2 | .840 | 15.10 | 8585.0 | 8580.8 | -4.2 |
| 10 | 180.0 | 32.0 | 13.2 | .845 | 14.50 | 7586.0 | 7457.7 | -128.3 |
| 11 | 180.0 | 32.0 | 13.2 | .845 | 14.80 | 8244.0 | 8108.9 | -135.1 |
| 12 | 180.0 | 32.0 | 13.2 | .845 | 15.10 | 8962.0 | 8802.2 | -159.8 |
| 13 | 180.0 | 32.24 | 13.0 | .845 | 14.50 | 7536.0 | 7460.2 | -75.8 |
| 14 | 180.0 | 32.24 | 13.0 | .845 | 14.80 | 8190.0 | 8111.7 | -78.3 |
| 15 | 180.0 | 32.24 | 13.0 | .845 | 15.10 | 8902.0 | 8805.2 | -96.8 |
| 16 | 180.0 | 32.24 | 13.0 | .850 | 14.50 | 7772.0 | 7651.5 | -120.5 |
| 17 | 180.0 | 32.24 | 13.0 | .850 | 14.80 | 8454.0 | 8319.7 | -134.3 |
| 18 | 180.0 | 32.24 | 13.0 | .850 | 15.10 | 9199.0 | 9031.0 | -168.0 |
| 19 | 180.0 | 32.24 | 13.2 | .830 | 14.50 | 6968.0 | 6971.3 | 3.3 |
| 20 | 180.0 | 32.24 | 13.2 | .830 | 14.80 | 7555.0 | 7580.1 | 25.1 |
| 21 | 180.0 | 32.24 | 13.2 | .830 | 15.10 | 8191.0 | 8228.1 | 37.1 |
| 22 | 180.0 | 32.24 | 13.2 | .835 | 14.50 | 7154.0 | 7153.3 | -0.7 |
| 23 | 180.0 | 32.24 | 13.2 | .835 | 14.80 | 7762.0 | 7778.0 | 16.0 |
| 24 | 180.0 | 32.24 | 13.2 | .835 | 15.10 | 8423.0 | 8443.0 | 20.0 |
| 25 | 180.0 | 32.24 | 13.4 | .820 | 14.50 | 6645.0 | 6677.1 | 32.1 |
| 26 | 180.0 | 32.24 | 13.4 | .820 | 14.80 | 7194.0 | 7260.2 | 66.2 |
| 27 | 180.0 | 32.24 | 13.4 | .820 | 15.10 | 7788.0 | 7880.9 | 92.9 |
| 28 | 180.0 | 32.24 | 13.4 | .825 | 14.50 | 6888.0 | 6853.6 | -34.4 |
| 29 | 180.0 | 32.24 | 13.4 | .825 | 14.80 | 7465.0 | 7452.1 | -12.9 |
| 30 | 180.0 | 32.24 | 13.4 | .825 | 15.10 | 8089.0 | 8089.2 | 0.2 |
| 31 | 181.0 | 32.0 | 13.0 | .845 | 14.50 | 7430.0 | 7368.4 | -61.6 |
| 32 | 181.0 | 32.0 | 13.0 | .845 | 14.80 | 8070.0 | 8011.9 | -58.1 |
| 33 | 181.0 | 32.0 | 13.0 | .845 | 15.10 | 8768.0 | 8696.9 | -71.1 |
| 34 | 181.0 | 32.0 | 13.0 | .850 | 14.50 | 7659.0 | 7557.4 | -101.6 |
| 35 | 181.0 | 32.0 | 13.0 | .850 | 14.80 | 8329.0 | 8217.3 | -111.7 |
| 36 | 181.0 | 32.0 | 13.0 | .850 | 15.10 | 9058.0 | 8919.9 | -138.1 |
| 37 | 181.0 | 32.0 | 13.2 | .835 | 14.50 | 7054.0 | 7065.5 | 11.5 |
| 38 | 181.0 | 32.0 | 13.2 | .835 | 14.80 | 7652.0 | 7682.4 | 30.4 |
| 39 | 181.0 | 32.0 | 13.2 | .835 | 15.10 | 8300.0 | 8339.3 | 39.3 |
| 40 | 181.0 | 32.0 | 13.2 | .840 | 14.50 | 7246.0 | 7248.8 | 2.8 |
| 41 | 181.0 | 32.0 | 13.2 | .840 | 14.80 | 7865.0 | 7881.8 | 16.8 |
| 42 | 181.0 | 32.0 | 13.2 | .840 | 15.10 | 8540.0 | 8555.7 | 15.7 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 43 | 181.0 | 32.24 | 12.8 | .850 | 14.50 | 7611.0 | 7558.4 | -52.6 |
| 44 | 181.0 | 32.24 | 12.8 | .850 | 14.80 | 8274.0 | 8218.4 | -55.6 |
| 45 | 181.0 | 32.24 | 12.8 | .850 | 15.10 | 8998.0 | 8921.1 | -76.9 |
| 46 | 181.0 | 32.24 | 13.0 | .840 | 14.50 | 7214.0 | 7251.2 | 37.2 |
| 47 | 181.0 | 32.24 | 13.0 | .840 | 14.80 | 7829.0 | 7884.4 | 55.4 |
| 48 | 181.0 | 32.24 | 13.0 | .840 | 15.10 | 8499.0 | 8558.5 | 59.5 |
| 49 | 181.0 | 32.24 | 13.0 | .845 | 14.50 | 7516.0 | 7438.3 | -77.7 |
| 50 | 181.0 | 32.24 | 13.0 | .845 | 14.80 | 8164.0 | 8087.8 | -76.2 |
| 51 | 181.0 | 32.24 | 13.0 | .845 | 15.10 | 8871.0 | 8779.3 | -91.7 |
| 52 | 181.0 | 32.24 | 13.2 | .825 | 14.50 | 6735.0 | 6773.0 | 38.0 |
| 53 | 181.0 | 32.24 | 13.2 | .825 | 14.80 | 7293.0 | 7364.4 | 71.4 |
| 54 | 181.0 | 32.24 | 13.2 | .825 | 15.10 | 7899.0 | 7994.0 | 95.0 |
| 55 | 181.0 | 32.24 | 13.2 | .830 | 14.50 | 6939.0 | 6950.9 | 11.9 |
| 56 | 181.0 | 32.24 | 13.2 | .830 | 14.80 | 7521.0 | 7557.9 | 36.9 |
| 57 | 181.0 | 32.24 | 13.2 | .830 | 15.10 | 8151.0 | 8204.1 | 53.1 |
| 58 | 181.0 | 32.24 | 13.4 | .815 | 14.50 | 6506.0 | 6485.2 | -20.8 |
| 59 | 181.0 | 32.24 | 13.4 | .815 | 14.80 | 7038.0 | 7051.5 | 13.5 |
| 60 | 181.0 | 32.24 | 13.4 | .815 | 15.10 | 7611.0 | 7654.4 | 43.4 |
| 61 | 181.0 | 32.24 | 13.4 | .820 | 14.50 | 6691.0 | 6657.7 | -33.3 |
| 62 | 181.0 | 32.24 | 13.4 | .820 | 14.80 | 7243.0 | 7239.1 | -3.9 |
| 63 | 181.0 | 32.24 | 13.4 | .820 | 15.10 | 7838.0 | 7858.0 | 20.0 |
| 64 | 182.0 | 32.0 | 13.0 | .840 | 14.50 | 7113.0 | 7162.0 | 49.0 |
| 65 | 182.0 | 32.0 | 13.0 | .840 | 14.80 | 7718.0 | 7787.5 | 69.5 |
| 66 | 182.0 | 32.0 | 13.0 | .840 | 15.10 | 8375.0 | 8453.3 | 78.3 |
| 67 | 182.0 | 32.0 | 13.0 | .845 | 14.50 | 7327.0 | 7346.8 | 19.8 |
| 68 | 182.0 | 32.0 | 13.0 | .845 | 14.80 | 7956.0 | 7988.4 | 32.4 |
| 69 | 182.0 | 32.0 | 13.0 | .845 | 15.10 | 8640.0 | 8671.4 | 31.3 |
| 70 | 182.0 | 32.0 | 13.2 | .830 | 14.50 | 6871.0 | 6865.6 | -5.4 |
| 71 | 182.0 | 32.0 | 13.2 | .830 | 14.80 | 7446.0 | 7465.1 | 19.1 |
| 72 | 182.0 | 32.0 | 13.2 | .830 | 15.10 | 8068.0 | 8103.3 | 35.3 |
| 73 | 182.0 | 32.0 | 13.2 | .835 | 14.50 | 7050.0 | 7044.8 | -5.2 |
| 74 | 182.0 | 32.0 | 13.2 | .835 | 14.80 | 7646.0 | 7660.0 | 14.0 |
| 75 | 182.0 | 32.0 | 13.2 | .835 | 15.10 | 8291.0 | 8314.9 | 23.9 |
| 76 | 182.0 | 32.24 | 12.8 | .850 | 14.50 | 7591.0 | 7536.1 | -54.9 |
| 77 | 182.0 | 32.24 | 12.8 | .850 | 14.80 | 8250.0 | 8194.1 | -55.9 |
| 78 | 182.0 | 32.24 | 12.8 | .850 | 15.10 | 8967.0 | 8894.7 | -72.3 |
| 79 | 182.0 | 32.24 | 13.0 | .835 | 14.50 | 7005.0 | 7047.0 | 42.0 |
| 80 | 182.0 | 32.24 | 13.0 | .835 | 14.80 | 7596.0 | 7662.4 | 66.4 |
| 81 | 182.0 | 32.24 | 13.0 | .835 | 15.10 | 8236.0 | 8317.5 | 81.5 |
| 82 | 182.0 | 32.24 | 13.0 | .840 | 14.50 | 7183.0 | 7229.9 | 46.9 |
| 83 | 182.0 | 32.24 | 13.0 | .840 | 14.80 | 7793.0 | 7861.2 | 68.2 |
| 84 | 182.0 | 32.24 | 13.0 | .840 | 15.10 | 8456.0 | 8533.4 | 77.4 |
| 85 | 182.0 | 32.24 | 13.2 | .820 | 14.50 | 6541.0 | 6579.3 | 38.3 |
| 86 | 182.0 | 32.24 | 13.2 | .820 | 14.80 | 7078.0 | 7153.8 | 75.8 |
| 87 | 182.0 | 32.24 | 13.2 | .820 | 15.10 | 7657.0 | 7765.5 | 108.5 |
| 88 | 182.0 | 32.24 | 13.2 | .825 | 14.50 | 6732.0 | 6753.2 | 21.2 |
| 89 | 182.0 | 32.24 | 13.2 | .825 | 14.80 | 7290.07 | 7342.9 | 52.9 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 90 | 182.0 | 32.24 | 13.2 | .825 | 15.10 | 7893.0 | 7970.7 | 77.7 |
| 91 | 182.0 | 32.24 | 13.4 | .810 | 14.50 | 6324.0 | 6297.8 | -26.2 |
| 92 | 182.0 | 32.24 | 13.4 | .810 | 14.80 | 6836.0 | 6847.8 | 11.8 |
| 93 | 182.0 | 32.24 | 13.4 | .810 | 15.10 | 7385.0 | 7433.3 | 48.3 |
| 94 | 182.0 | 32.24 | 13.4 | .815 | 14.50 | 6494.0 | 6466.4 | -27.6 |
| 95 | 182.0 | 32.24 | 13.4 | .815 | 14.80 | 7023.0 | 7031.1 | 8.1 |
| 96 | 182.0 | 32.24 | 13.4 | .815 | 15.10 | 7594.0 | 7632.2 | 38.2 |
| 97 | 183.0 | 32.0 | 12.8 | .850 | 14.50 | 7499.0 | 7443.4 | -55.6 |
| 98 | 183.0 | 32.0 | 12.8 | .850 | 14.80 | 8146.0 | 8093.3 | -52.7 |
| 99 | 183.0 | 32.0 | 12.8 | .850 | 15.10 | 8850.0 | 8785.3 | -64.7 |
| 100 | 183.0 | 32.0 | 13.0 | .835 | 14.50 | 6922.0 | 6960.4 | 38.4 |
| 101 | 183.0 | 32.0 | 13.0 | .835 | 14.80 | 7504.0 | 7568.3 | 64.3 |
| 102 | 183.0 | 32.0 | 13.0 | .835 | 15.10 | 8133.0 | 8215.3 | 82.3 |
| 103 | 183.0 | 32.0 | 13.0 | .840 | 14.50 | 7109.0 | 7141.1 | 32.1 |
| 104 | 183.0 | 32.0 | 13.0 | .840 | 14.80 | 7711.0 | 7764.7 | 53.7 |
| 105 | 183.0 | 32.0 | 13.0 | .840 | 15.10 | 8365.0 | 8428.5 | 63.5 |
| 106 | 183.0 | 32.0 | 13.2 | .825 | 14.50 | 6609.0 | 6670.4 | 61.4 |
| 107 | 183.0 | 32.0 | 13.2 | .825 | 14.80 | 7154.0 | 7252.9 | 98.9 |
| 108 | 183.0 | 32.0 | 13.2 | .825 | 15.10 | 7744.0 | 7873.0 | 129.0 |
| 109 | 183.0 | 32.0 | 13.2 | .830 | 14.50 | 6856.0 | 6845.6 | -10.4 |
| 110 | 183.0 | 32.0 | 13.2 | .830 | 14.80 | 7382.0 | 7443.4 | 61.4 |
| 111 | 183.0 | 32.0 | 13.2 | .830 | 15.10 | 7997.0 | 8079.8 | 82.8 |
| 112 | 183.0 | 32.24 | 12.8 | .845 | 14.50 | 7246.0 | 7326.0 | 80.0 |
| 113 | 183.0 | 32.24 | 12.8 | .845 | 14.80 | 7867.0 | 7965.8 | 98.8 |
| 114 | 183.0 | 32.24 | 12.8 | .845 | 15.10 | 8539.0 | 8646.8 | 107.8 |
| 115 | 183.0 | 32.24 | 12.8 | .850 | 14.50 | 7571.0 | 7513.9 | -57.1 |
| 116 | 183.0 | 32.24 | 12.8 | .850 | 14.80 | 8225.0 | 8170.0 | -55.0 |
| 117 | 183.0 | 32.24 | 12.8 | .850 | 15.10 | 8937.0 | 8868.5 | -68.5 |
| 118 | 183.0 | 32.24 | 13.0 | .830 | 14.50 | 6813.0 | 6847.6 | 34.6 |
| 119 | 183.0 | 32.2 | 13.0 | .830 | 14.80 | 7380.0 | 7445.6 | 65.6 |
| 120 | 183.0 | 32.2 | 13.0 | .830 | 15.10 | 7993.0 | 8082.1 | 89.1 |
| 121 | 183.0 | 32.2 | 13.0 | .835 | 14.50 | 6989.0 | 7026.4 | 37.4 |
| 122 | 183.0 | 32.2 | 13.0 | .835 | 14.80 | 7576.0 | 7640.0 | 64.0 |
| 123 | 183.0 | 32.2 | 13.0 | .835 | 15.10 | 8211.0 | 8293.2 | 82.2 |
| 124 | 183.0 | 32.2 | 13.2 | .820 | 14.50 | 6516.0 | 6560.2 | 44.2 |
| 125 | 183.0 | 32.2 | 13.2 | .820 | 14.80 | 7050.0 | 7133.0 | 83.0 |
| 126 | 183.0 | 32.2 | 13.2 | .820 | 15.10 | 7626.0 | 7742.9 | 116.9 |
| 127 | 183.0 | 32.2 | 13.2 | .825 | 14.50 | 6705.0 | 6733.6 | 28.6 |
| 128 | 183.0 | 32.2 | 13.2 | .825 | 14.80 | 7259.0 | 7321.6 | 62.6 |
| 129 | 183.0 | 32.2 | 13.2 | .825 | 15.10 | 7857.0 | 7947.6 | 90.6 |
| 130 | 183.0 | 32.2 | 13.4 | .805 | 14.50 | 6198.0 | 6115.0 | -83.0 |
| 131 | 183.0 | 32.2 | 13.4 | .805 | 14.80 | 6696.0 | 6648.9 | -47.1 |
| 132 | 183.0 | 32.2 | 13.4 | .805 | 15.10 | 7227.0 | 7217.4 | -9.6 |
| 133 | 183.0 | 32.2 | 13.4 | .810 | 14.50 | 6312.0 | 6279.6 | -32.4 |
| 134 | 183.0 | 32.2 | 13.4 | .810 | 14.80 | 6821.0 | 6828.0 | 7.0 |
| 135 | 183.0 | 32.2 | 13.4 | .810 | 15.10 | 7369.0 | 7411.8 | 42.8 |