

PARAMETRIZACIJA I MODIFIKACIJA BRODSKE FORME

Mikša, Lea

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:152366>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-12**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij brodogradnje

Završni rad

PARAMETRIZACIJA I MODIFIKACIJA BRODSKE FORME

Mentor: Anton Turk

Lea Mikša

Rijeka, rujan 2023.

0069083138

IZJAVA

„Na temelju čl. 9. Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku preddiplomskih studija, izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad uručen 21. ožujka 2022. pod naslovom „ Izrada modela i radioničke tehničke i tehnološke dokumentacije trupa broda“.

Rijeka, rujan 2023.

Lea Mikša:

ZAHVALA

Htjela bih se najviše zahvaliti svom mentoru prof. dr. sc. Antonu Turku na vodstvu i pruženoj pomoći. Zahvaljujem se i svim profesorima i asistentima Tehničkog fakulteta u Rijeci na prenesenom znanju kroz dosadašnje školovanje.

Također se zahvaljujem svojoj obitelji, prijateljima i partneru na bezuvjetnoj podršci kroz moje školovanje. Hvala im na svemu!

Sadržaj

1. Uvod.....	5
2. Projektiranje broda.....	6
2.1. Tradicionalni pristup.....	6
2.2. Integrirani pristup.....	7
3. Modeliranje trupa.....	9
3.1. Konvencionalni.....	10
3.2. Djelomično parametarski.....	10
3.3. Potpuno parametarski pristup.....	11
4. Optimizacija broda.....	16
4.1. Holistička metoda optimizacije broda.....	16
4.2. Pareto optimizacija.....	16
4.3. Projekt eksperimenta.....	17
4.4. Genetski algoritmi.....	17
4.5. Simulacija.....	17
4.6. Integracija.....	18
5. Razvoj modela trupa.....	19
5.1. Glavne dimenzije.....	19
5.2. Glavno rebro.....	21
5.3. Krivulja ravnog dna.....	24
5.4. Krivulja ravnog boka.....	26
5.5. Projektna vodena linija (engl. Design Water Line, DWL).....	28
5.6. Linija palube (Deck line).....	30
5.7. Linija uzdužne konture.....	32
5.7.1. Pramčana statva (Stem).....	32
5.7.2. Pramčani bulb.....	34
5.7.2. Krmeno zrcalo.....	38
6. Zaključak.....	40
7. Literatura.....	41
8. Popis oznaka i kratica.....	42
9. Popis slika.....	43
10. Popis tablica.....	44
11. Sažetak.....	47
Abstract.....	47

1.Uvod

Brod je izuzetno kompleksan proizvod, za čiju je izradu potreban tim stručnjaka. Potrebno je osigurati kvalitetu, sigurnost i dugotrajnost uz što niže troškove. Danas je posebno važno vrijeme projektiranja i same gradnje te se intenzivno istražuju metode kojima bi se proces maksimalno ubrzao bez smanjenja kvalitete samog produkta. Novije vrijeme donosi i sve veći interes za smanjenje negativnih djelovanja u smislu ekologije. Klasičan pristup sve teže prati brze promjene na tržištu i stvaranje novih metoda postaje neophodno. Kao posljedica razvoja tehnologije, posebno CFD sustava, optimizacija broskog sustava postaje neizostavni element kod razvoja novog projekta. Osim toga, svijet se okreće integriranom pristupu koji izvršavanjem više zadataka istovremeno znatno ubrzava projektiranje.

Cilj ovog rada je opis stvaranja novog modela broda iz već postojećeg koristeći parametarski pristup projektiranju. Parametrizacija je način modeliranja novog doba, široko je primjenjiva i moguće je potpuno automatizirati samo modeliranje. Međutim, to je pristup koji je još uvijek u razvitku pa kada se radi o nekim specifičnim izvedbama još uvijek ne daje potpuno zadovoljavajuće rezultate.

Rad je započet kratkim osvrtom na projektiranje broda u cjelini te na različite pristupe projektu s naglaskom na parametarski pristup. Kratko je opisana i optimizacija broda budući da je ona temelj dobro odrađenog projekta. U 5. poglavlju su opisane glavne krivulje broskog trupa, također su definirani njihovi parametri te raspon vrijednosti koje isti mogu poprimiti. Kako bi što vjerodostojnije prikazala sam postupak modeliranja novih krivulja služila sam se primjerima iz diplomskog rada „Parametric Modelling of Hull Form for Ship Optimization“ autorice Filipe Marques Sanches. Modeliranje je odrađeno u softveru FRIENDSHIP-Modelling, a rezultati su prikazani u obliku tablica.

2. Projektiranje broda

Projektiranje trupa broda kakvo poznajemo danas počelo se razvijati vrlo kasno. U svojim začetcima trup se projektirao metodom pokušaja i pogreške koja nije imala znanstvenu podlogu.

Brodogradnja danas je vrlo kompleksna grana. Potrebno je uskladiti više različitih polja kako bi finalni produkt odgovarao zahtjevima tržišta. Projekt je potrebno izraditi uzimajući u obzir sva ograničenja i zahtjeve tijekom cijelog proizvodnog procesa sve od preliminarnih ideja pa do same izrade broda.

Sam proizvodni proces broda započet će izradom plana na osnovu zahtjeva naručitelja kao što su nosivost i brzina, te zadanim budžetom. Gradnji broda prethodi niz koraka kao što je izrada tehničke dokumentacije, izrada proračuna, planiranje pojedinih etapa gradnje, te osiguravanje traženih materijala i opreme. Kada je projekt završen i odobren, može se započeti sa gradnjom koja se sastoji od obrade građevnih dijelova trupa, predmontaže i montaže sekcija, sklopova i modula. Na samom kraju brod se oprema, izvode se završna ispitivanja te je spreman za pokusnu plovidbu. Ukoliko je pokusna plovidba zadovoljila, brodogradilište vrši primopredaju broda naručitelju.

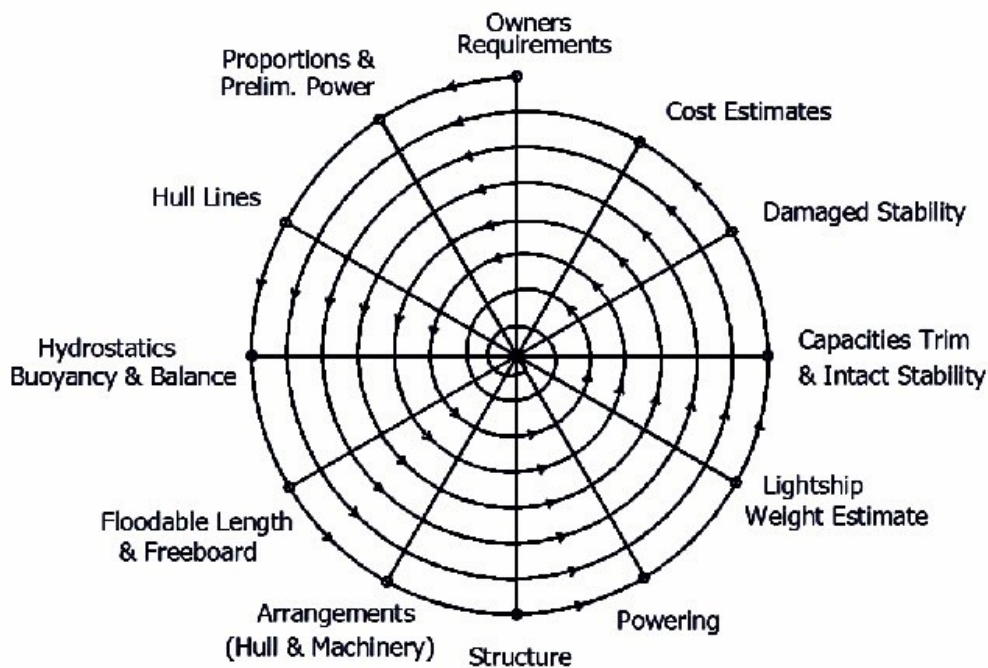
Bitno je naglasiti da inženjer prilikom projektiranja mora zadovoljiti kvalitetom broda tijekom njegovog cijelog životnog vijeka. To znači da je potrebno izraditi projekt koji ne samo da će zadovoljavati zahtjeve pokusne plovidbe i plovidbe u idealnim uvjetima već osigurati funkcionalnost broda u službi tijekom dužeg niza godina.

Projektiranje broda je kompleksan zadatak koji zahtjeva međusobno povezivanje različitih faktora u cjelinu.

2.1. Tradicionalni pristup

Tradicionalni pristup projektiranju temelji se na odrađivanju niza koraka pri čemu u svakom koraku dodajemo detalje i razvijamo projekt sve dok ne dobijemo završnu verziju koja zadovoljava sva ograničenja i zahtjeve.

J. Evans još je 1959. godine tradicionalni pristup vizualizirao dijagramom poznatim kao „Ship Design Spiral“ (slika 2.1).



Slika 2.1.: „Ship Design Spiral „ (Evans, 1959.) [1]

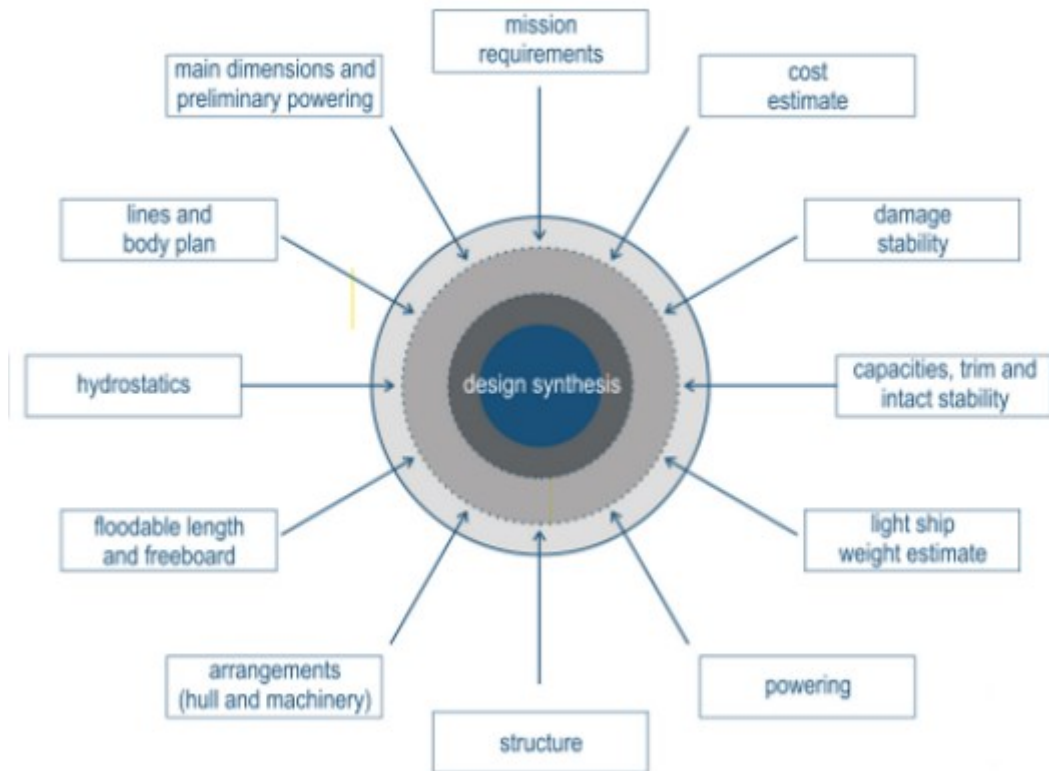
Zahtjevi naručitelja su polazišna točka konceptualne faze koja obuhvaća preliminarnu procjenu snage, određivanje oblika trupa, preliminarnu hidrostatičke proračune i proračune stabiliteta, određivanje općeg plana i preliminarnu troškove materijala i opreme. U ovoj fazi potrebno je uočiti veće nepravilnosti te se raspravlja o mogućim rješenjima. Prema željama naručitelja i mogućnostima inženjera projekt se u svakoj kasnijoj fazi sve više usavršava i nadograđuje sve dok ne dobijemo finalni projekt.

Problem koji nastaje kod tradicionalnog pristupa je teško popravljavanje grešaka u kasnijim fazama projekta. Tada su promjene skupe i dugotrajne. Upravo to je razlog što takav pristup nije idealan, posebice za projektiranje današnjih plovila koja su često vrlo kompleksna, a istovremeno se vrijeme potrebno za projekt pokušava svesti na minimum.

2.2.Integrirani pristup

Danas se prednost daje integriranoj metodi poznatoj kao Holistički pristup projektu (Holistic Design Approach). Za razliku od tradicionalnog pristupa, prema kojem je potrebno svaki korak

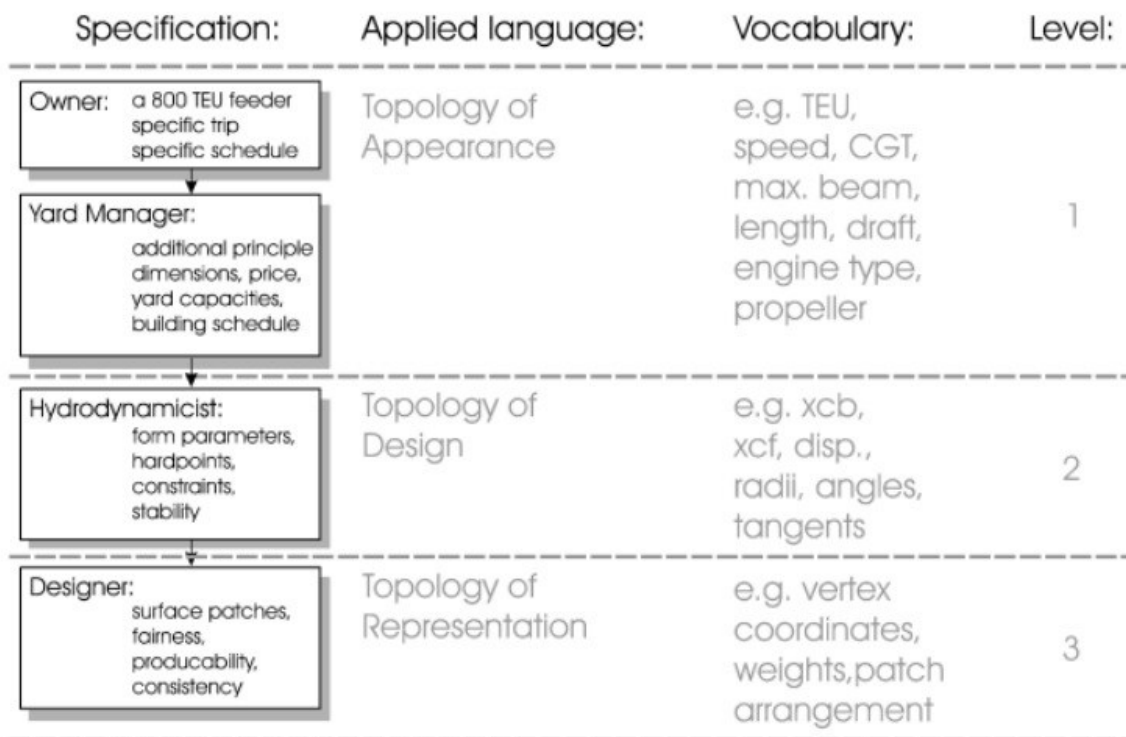
završiti prije prelaska na sljedeći, integrirani pristup podrazumijeva izvršavanje više zadataka istovremeno (Slika 2.2.).



Slika 2.2.: "Holistic Design Approach" [1]

3. Modeliranje trupa

Trup broda čini temelj broskog sustava zbog čega sama struktura trupa ima izniman značaj u hidrodinamici i stabilnosti broda. Proces modeliranja trupa može se izvesti na bilo kojoj razini topologije. Razlikujemo: topologiju izgleda, topologiju dizajna i topologiju reprezentacije.



Slika 3.1: Topološke razine [2]

Glavni cilj definicije trupa je razviti geometrijski opis u kojem su sve relevantne fizičke i geometrijske karakteristike. Trup možemo projektirati redizajniranjem postojećeg oblika ili ga stvoriti od početka. Brodogradilišta obično koriste svoje podatke temeljene na prethodnim projektima za stvaranje idućih.

Tehnike geometrijskog modeliranja možemo podijeliti na konvencionalno projektiranje, djelomično parametarsko i potpuno parametarsko.

3.1. Konvencionalni

Kada govorimo o konvencionalnoj metodi krivulje i plohe su definirane točkama. Konvencionalna metoda podrazumijeva dva moguća pristupa stvaranja geometrije. Kod jednog projektant stvara geometriju stvaranjem točaka, linija i na kraju površina. U drugom pristupu, projektant manipulira geometrijom pomičući svaku točku zasebno povezivajući svaku površinu s vrhovima poliedra (Bezierovi i B-spline koncepti). Jednom kada je geometrija razvijena, potrebno je analizirati točnost oblika trupa npr. uspoređujući dijagrame zakrivljenosti oblika. Projektant zatim treba modificirati geometriju sve dok ne postigne željene parametre oblika i zadovoljavajuću točnost. Prednost ovakvog pristupa je potpuna kontrola nad oblikom trupa i velika fleksibilnost pri kreiranju geometrije. Međutim, problem može stvarati postizanje željenog oblika trupa kod određenih ograničenja i zadane točnosti. Takav pristup je tada vremenski neisplativ te je poželjna primjena neke druge metode.

3.2. Djelomično parametarski

Djelomično parametarski način modeliranja temelji se na nadogradnji postojećih oblika ili modificiranju istih izmjenom određenih parametara. Svaki novi trup dobiven takvim pristupom imati će određene karakteristike matičnog trupa.

Primjeri djelomično parametarskih pristupa:

- Spajanje – dva ili više oblika se spajaju kako bi se proizveo novi oblik
- Deformacija okvira „kutije“ – oblik koji želimo modificirati stavljamo unutar okvira „kutije“ koju potom deformiramo mijenjajući tako osnovni oblik
- Dodatna pertubacija zakrpe – zakrpa koju postavljamo na vrh osnovnog oblika koristi se za njegovu deformaciju
- Njihanje/pomicanje – krivulja površine presjeka matičnog trupa se mijenja; novi se trup utvrđuje uzdužnim pomicanjem cijelih sekcija kako bi odgovarale novoj krivulji površine presjeka [1]

Za razliku od konvencionalnog pristupa, ovakav pristup je brz i relativno jednostavan. Posebno je pogodan kada je potrebna izvedba više varijanti trupa. Glavni nedostatak je smanjena fleksibilnost i smanjena kontrola trupa pri kreiranju geometrije.

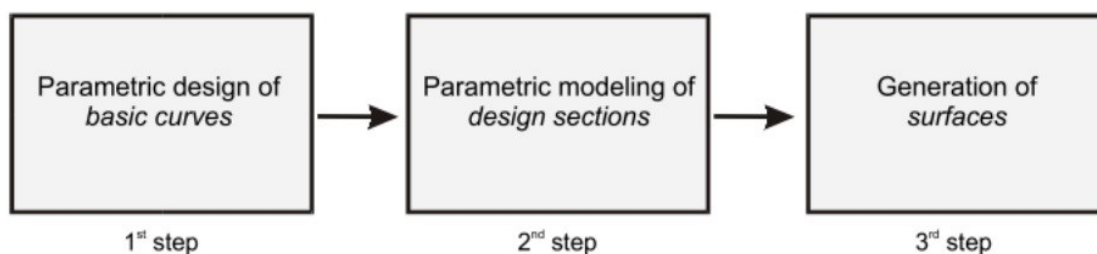
3.3. Potpuno parametarski pristup

Kod potpuno parametarskog pristupa oblik trupa modelira se sa čim manje podataka. Geometrija trupa definirana je sa karakterističnim krivuljama kao što su krivulja glavnog rebra, uzdužne konture broda, krivulje ravnog dna, ravnog boka, projektna vodna linija. Umjesto stvaranja oblika točkama i ručnim stvaranjem geometrije, projektant definira parametre (duljina, širina, gaz, površina, volumen, tangente, nagib...) i prepušta sustavu da odredi odgovarajuću geometriju.

Na samom početku projekta nije potrebno, a nije ni moguće poznavati sve parametre. One koji nisu poznati na početku moguće je dobiti optimizacijom. Dobiveni parametri uvode se u matematički model koji se zatim može modificirati te ponovno uvesti u optimizaciju kako bi se dobio finalni produkt. Svaki novi oblik trupa stvara se upravo na taj način.

Proces modeliranja golog trupa može se podijeliti u tri faze:

1. Parametarsko projektiranje skupa uzdužnih osnovnih krivulja
2. Parametarsko modeliranje skupa sekcija dobivenih na temelju osnovnih krivulja
3. Generiranje manjeg skupa površina koje interpoliraju projektne sekcije



Slika 3.2.: Proces modeliranja trupa [2]

Glavni cilj parametarskog pristupa je olakšati projektiranje trupa. Budući da se trup ne izvodi od nule potrebno vrijeme za sam projekt bitno je skraćeno. Ovakav pristup dopušta modifikaciju oblika te optimizaciju hidrodinamičkih performansi. Malim izmjenama mogu se stvoriti novi oblici trupa. Međutim, te izmjene ne smiju biti ekstremne što može biti nedostatak u smislu nedovoljne fleksibilnosti.

Softver „FRIENDSHIP-Modeler“ pokazuje vrlo dobre rezultate u parametarskom projektiranju. U daljnjem radu korišteni su primjeri modeliranja karakterističnih krivulja broda u istome. Naravno, treba naglasiti da to svakako nije jedini softver koji ima za cilj parametrizaciju, ali svakako ima vodeće mjesto na tržištu danas.

Najčešće korištena metoda generiranja parametara oblika trupa je uparivanje diskretnih podataka s parametarskim prikazima NURBS ploha. Iz NURBS ploha proizlaze ostale krivulje – B-spline, Bezierove krivulje, kubne krivulje... Dobiveni podaci koriste se kao varijable za modificiranje oblika. Kako bi rezultati bili što točniji, brod je potrebno podijeliti u manje sekcije koristeći za svaku manji broj kontrolnih točaka. Učinkovito grupiranje točaka dati će realne promjene na trupu broda. Glavna metoda parametrizacije je transformiranje već postojećeg trupa u cilju dobivanja novog.

Generiranje krivulje započinje njezinom matematičkom definicijom iz skupa zadanih elemenata. U nastavku će pobliže biti objašnjene B-spline krivulje (F-spline) budući su segmenti glavnih krivulja broskog trupa (opisanih u poglavlju 5.) modelirani pomoću istih. F-spline krivulje omogućavaju korisniku kontrolu ulaza i kuta kretanja svake krivulje te površine i težišta segmenata nekih krivulja. Dakle, iako je parametrizacija automatiziran postupak, ipak dozvoljava manipuliranje pojedinim koeficijentima ručno u cilju izrade što boljeg modela.

Opća formula parametarski optimizirane krivulje: [3]

$$\mathbf{r}(t) = (x(t), y(t), z(t)) \quad (3.1.)$$

Neka je $\mathbf{r}(t)$ vektorska slobodna krivulja parametrizirana s veličinom t .

$$L_m = \int_0^1 (D^m \mathbf{r}(t))^2, \text{ where } D^m = d^m/dt^m \quad (3.2.)$$

Minimiziranjem kriterija pravednosti m -tog reda dobivamo izraz 3.2. koji je podložan ograničenjima.

$$A = \sum_{i=0}^n \{w_i(\mathbf{r}(t_i) - P_i)\}^2 - \varepsilon \leq 0, \quad \varepsilon \geq 0 \quad (3.3.)$$

Ograničenje udaljenosti – Euklidska udaljenost između danih podatkovnih točaka P_i i rezultirajućeg $\mathbf{r}(t)$

$$E_1 = D^1 \mathbf{r}(t_i) - \mathbf{Q}_i = 0 \quad (3.4.)$$

$$E_2 = D^2 \mathbf{r}(t_i) - \mathbf{K}_i = 0 \quad (3.5.)$$

Krajnja ograničenja – za prvu i zadnju točku na krivulji, razlikujemo tangentne vektore Q_i i vektore zakrivljenosti K_i , dva tipa izraza za krajnja ograničenja za $i=0$ ili $i=n$ dana su u izrazima 3.4. i 3.5.

$$F = S - S_0 = 0 \quad (3.6)$$

Ograničenja površine – stvarna površina ispod krivulje (S) treba odgovarati zadanoj vrijednosti površine (S_0)

Osim ovih, postoji još niz ograničenja koja mogu biti zadana jednakostima ili nejednakostima.

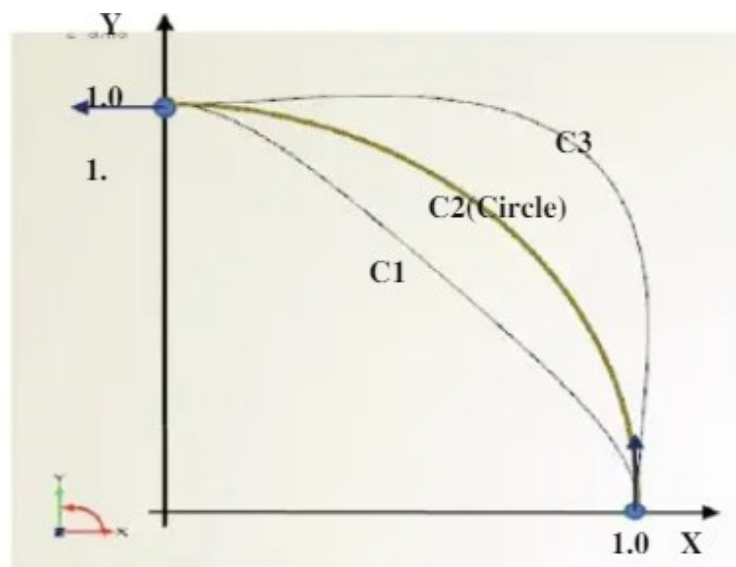
$$\min I = L_m + \lambda A' + \mu_1 E_1 + \mu_2 E_2 + vF, \quad A' = A + d^2 \quad (3.7)$$

Uvođenjem ograničenja, definiramo funkciju I gdje su μ , λ i v Lagrangeovi multiplikatori, a d je varijabla Kada je ovo problem interpolacije $d=0$. Stupanj kriterija pravednosti utječe na karakteristike oblika. Tablica 3.1. prikazuje primjer parametara oblika ravninske krivulje.

Tablica 3.1: Parametri oblika koji opisuju ravninsku krivulju [3]

	C1		C2 (circle)		C3	
	$i = 0$	$i = 1$	$i = 0$	$i = 1$	$i = 0$	$i = 1$
Position X_i, Y_i (m)	1, 0	0, 1	1, 0	0, 1	1, 0	0, 1
Tangent angle Q_i (°)	90	180	90	180	90	180
Curvature K_i	4.80	4.80	1	1	-0.624	-0.624
Area S (m ²)	$\pi/4/1.25$		$\pi/4$		$1.25 \times \pi/4$	
Centroid X_C, Y_C (m)	0.37, 0.37		0.42, 0.42		0.49, 0.49	
Fairness E_2	8.72		6.09		15.14	

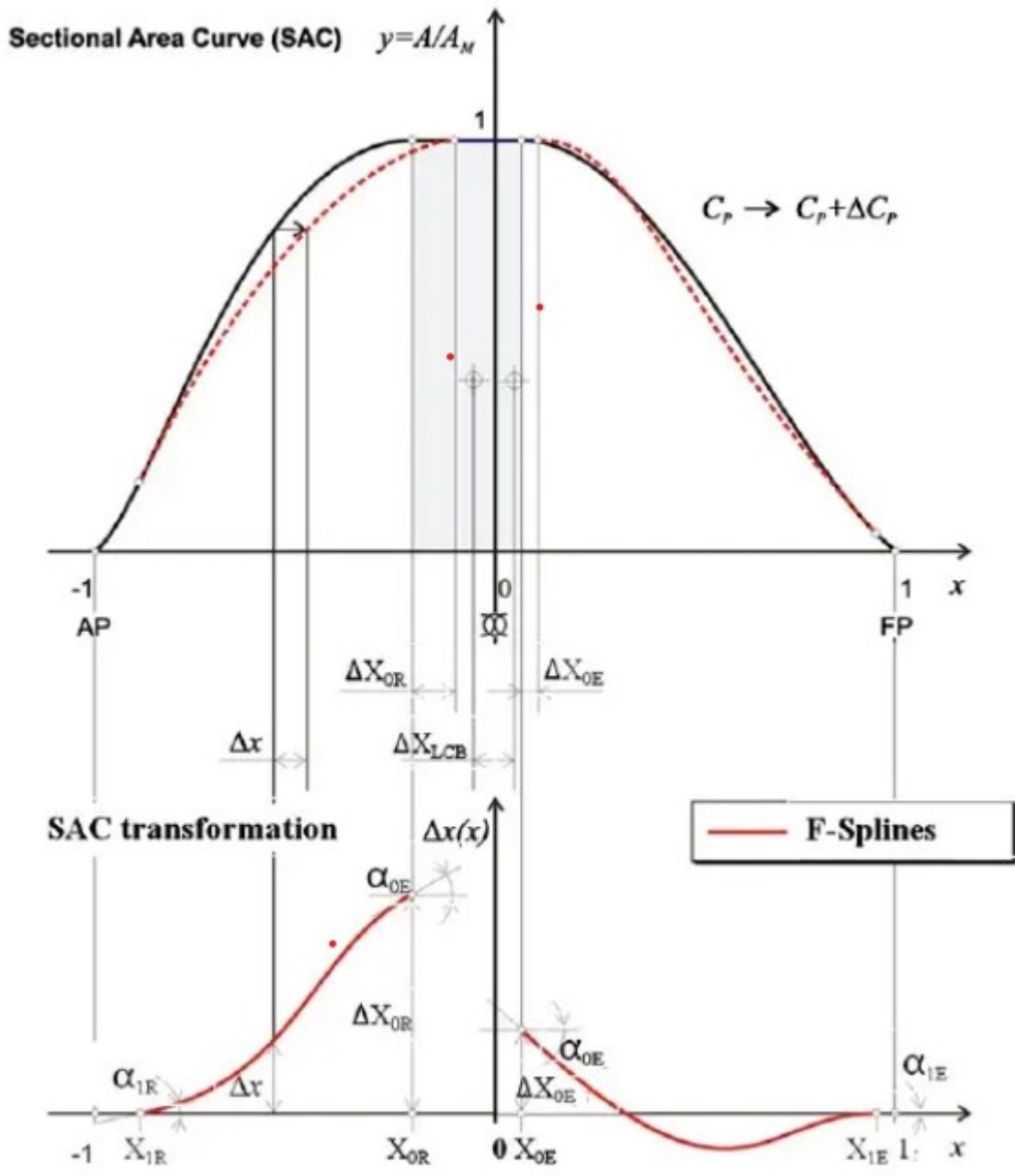
Slika 3.2. prikazuje parametarsku krivulju optimiziranu za izglađenu formu s različitim područjima ograničenja površine. Položaji i tangentni kutovi zadani su kao ulazni parametri. Krivulja se generira iz točke na x-osi u smjeru suprotnom od kazaljke na satu.



Slika 3.3.: Parametarska krivulja optimizirana za izgladenu formu s različitim područjima ograničenja površine [3]

Kod projektiranja brodova za transformaciju osnovnih krivulja broda koristimo transformacijske funkcije. To su matematičke formulacije koje definiraju stupanj transformacije dane geometrije koji je potreban za postizanje novog oblika. Razlikujemo transformacijske funkcije sa ograničenjima i bez ograničenja. Funkcija bez ograničenja uglavnom se koristi u hidrodinamičkoj optimizaciji. Kako bi dobili zadovoljavajuće rješenje te osigurali ispunjenje zahtjeva potrebna je dodatna iteracija. Funkcija ograničene transformacije treba osigurati ograničenja zadana projektom prije nego se primjeni za transformaciju oblika trupa, takve funkcije imaju uglavnom jednostavan oblik i manje stupnjeva slobode. [3]

Primjer funkcije sa ograničenjima je Lackenbyjeva transformacija. Izražena je polinomom prvog ili drugog stupnja, a uglavnom je korištena za transformaciju krivulje poprečnog presjeka (Sectional Area Curve – SAC). Ova se transformacija uglavnom koristi u preliminarnoj fazi projektiranja. Funkcija se izražava pomoću parametara oblika – C_p , LCB, L_R i L_E . U primjeru na Slici 3.7. prikazan je primjer transformacije SAC- a F-splineom.



Slika 3.4.: Primjer transformacije SAC krivulje [3]

4. Optimizacija broda

Optimizacija broda relativno je novo polje u brodogradnji. Počela se razvijati prije tridesetak godina razvitkom CFD-a.

Optimizacija općenito znači korištenje resursa na najučinkovitiji način. Svrha optimizacije broda je za glavne funkcionalne djelove projekta izabrati najbolje moguće rješenje. Kod klasičnog pristupa postoji samo jedan kriterij optimizacije, odnosno jedan skup ograničenja. Takav pristup je svakako najjednostavniji, međutim kod kompleksnog proizvoda kao što je brod nema smisla. Kada se radi o optimizaciji brodskog trupa potrebno je ispuniti više zahtjeva istovremeno, kao što su zahtjevi vlasnika broda, klasifikacijskog društva, osiguravatelja ali i mogućnosti brodogradilišta.

Dakle, ne postoji samo jedno rješenje, postoji ih beskonačno mnogo, a zadatak projektanta je izabrati ono koje u danoj situaciji najbolje odgovara. Postoji nekoliko metoda optimizacije koje će biti opisane u nastavku.

4.1. Holistička metoda optimizacije broda

Holistička metoda optimizacije broda ne uzima u obzir samo pojedinačne komponente i sustave broda već razmatra međusobno djelovanje istih kako bi se postigla najbolja ukupna izvedba, učinkovitost, sigurnost i održivost. Zahtjeva međusobnu suradnju inženjera brodogradnje, stručnjaka za okoliš i ostalih stručnjaka u pomorskoj industriji. Cilj nije stvoriti samo plovila koja su učinkovita i sigurna već se danas veliki naglasak daje na ekološki prihvatljivim izvedbama koja svakako moraju biti i ekonomski održivi na duge staze. Kako se tehnologija, a i regulacije mijenjaju i razvijaju polje optimizacije se razvija kako bi zadovoljile promjenjive potrebe brodograđevne industrije. [4]

4.2. Pareto optimizacija

Pareto optimizacija se često naziva i optimizacija s više ciljeva. To je metoda koja se koristi kod projektiranja broda za pronalaženje optimalnih kompromisa kod višestrukih proturječnih ciljeva ili kriterija. Svrha Pareto metode je istovremeno razmatranje i optimiziranje različitih parametara projekta i kriterija izvedbe u kojem se niti jedan cilj ne može poboljšati bez pogoršanja drugoga.

Pareto optimizacija uključuje korištenje matematičkih algoritama i simulacijskih alata kojima se određuje skup povoljnih rješenja. Projektanti nadalje mogu birati iz tog skupa na temelju svojih specifičnih prioriteta i ograničenja.

Neki od predmeta Pareto optimizacije jesu minimiziranje potrošnje goriva, brzina izgradnje broda, sigurnost, utjecaj na okoliš, kapacitet tereta, itd.

4.3. Projekt eksperimenta

„Design of Experiment“ (DoE) je metoda kojom projektant razmatra više parametara kvantitativno te analizira njihov učinak na cjelokupni projekt. Također, koristi se za određivanje faktora koji pobliže opisuju projekt, fokusirajući se na pronalazak relevantnih promjena npr. minimuma i maksimuma.

4.4. Genetski algoritmi

Genetski algoritmi su nelinearne metode optimizacije koje primjenjuju metode selekcije, reprodukcije i mutacije zadržavajući samo najbolje rješenje. Metoda nije primjerena za probleme s više ciljeva (kao npr. Pareto metoda), ali može davati sveobuhvatnije rješenje ako je kombinirana s drugim optimizacijskim alatima i tehnikama.

4.5. Simulacija

Simulacija je pokušaj predviđanja ponašanja sustava stvaranjem njegovog približnog modela uz izostavljanje manje važnih karakteristika. Tehnološkim napredkom simulacija ima sve bolje rezultate. Postaje moguće ispitivati više elemenata projekta istovremeno u sve kraćem vremenskom periodu. Osim toga, razvitkom specijaliziranih programa točnost simulacije je sve veća, virtualni modeli često postaju toliko pouzdani da se razna ispitivanja danas mogu obaljati isključivo pomoću računala.

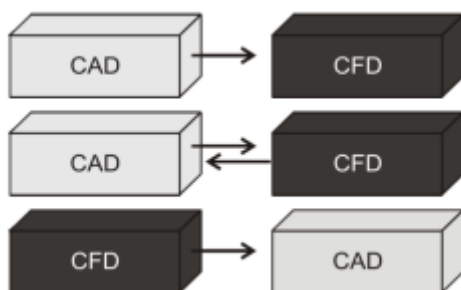
Simulacija u brodogradnji ima posebno velik značaj budući da su fizički modeli često jako skupi, a izmjene na njima komplicirane i dugotrajne. Zbog toga, gotovo u svakom segmentu projektiranja broda danas primjenjujemo računalnu simulaciju. Pomoću iste predviđamo

ponašanje broda u različitim uvjetima te analiziramo njegova hidrostatičke, hidrodinamičke i strukturalne značajke.

4.6. Integracija

Budući da projektiranje broda kompleksan posao, projekt je podijeljen u segmente. Na tim segmentima radi nekoliko članova tima koji su računalno umreženi u sustav pomoću datoteka. Dakle, integracija se u brodogradnji odnosi na koordinaciju različitih aspekata procesa projektiranja i izgradnje broda kako bi se postigla efikasnost, kvalitet i smanjili troškovi prilikom istoga.

Nakon određivanja geometrije broda, podaci se ubacuju u simulacijske programe npr. CFD (Computational Fluid Dynamics) te se podaci na samom kraju analiziraju i izvode zaključci. Međutim, takav način je dugotrajan, budući da za ispravljanje grešaka treba cijeli postupak ponoviti često i nekoliko puta. Integracijom, ti koraci se isprepliću, te se stvara CAE sustav koji je zapravo kombinacija CAD-a i CFD-a. CAE znatno ubrzava proces projektiranja.



Slika 4.1.: Tehnike projektiranja u prošlosti (na vrhu), sadašnjosti (sredina) i budućnosti(dno)

[1]

Primjer integracije sustava je softver „FRIENDSHIP-Framework“ kojeg ćemo pobliže upoznati u nastavku.

5. Razvoj modela trupa

Za razvoj parametrizacije broskog trupa prethodno je bilo potrebno stvoriti bazu podataka sa svim relevantnim parametrima koji mogu opisati što veći broj tipova trupova. Za svaki tip trupa potrebno je poznavati ponašanje karakterističnih geometrijskih krivulja te raspon granica i vrijednosti parametara.

U ovom radu korištena je baza podataka parametara za neke tankere, kontejnerske brodove, brodove za rasuti teret i trajekte. U istoj su razmatrane dvije vrste krivulja: geometrijske krivulje (predstavljaju stvarne konture trupa) i krivulje raspodjele svojstava (predstavljaju funkcije svojstava površina trupa duž jednog smjera oblika trupa). Za karakterizaciju istih korišteni su parametri koji predstavljaju mjere udaljenosti, mjere kutova, itd. Parametrizacijom se lakše dolazi do promjena na trupu budući da promjenom jednog parametra, svi se parametri ovisni o njemu mijenjaju. Unos parametara može se odraditi ručno ili uvozom ASCII datoteke nakon čega je moguća njihova modifikacija.

Moguća je manipulacija s gotovo stotinu parametara, a savjetuje se promjene izvoditi ovim redosljedom:

1. promjene na parametrima glavnih dimenzija trupa
2. promjene na vrijednostima koeficijenata koji definiraju svaku geometrijsku krivulju forme trupa

U nastavku rada ukratko će biti opisana analiza već postojećih trupova, njihovih parametara te uobičajenih raspona vrijednosti. Radi jednostavnijeg prikaza modeliranja novog projekta, odnosno karakterističnih krivulja broskog trupa. korišteni su stvarni primjeri preuzeti iz rada „Parametric Modelling of Hull Form for Ship Optimization, Filipa Marques Sanches“. Modeliranje je izvedeno u već spomenutom softveru FRIENDSHIP-Modeling.

5.1. Glavne dimenzije

Kako bi bila stvorena baza podataka bilo je potrebno odrediti veze među glavnim dimenzijama za svaki od promatranih tipova brodova. Te dimenzije, kao i njihovi odnosi biti će temelj za određivanje parametara pomoću kojih, na osnovu već modeliranih trupova, možemo izraditi novi projekt. Odnosi su određeni koeficijentima, prikazani u tablicama. U obzir su uzete veze između

širine (B) i dužine između okomica (L_{pp}), gaza (D) i dubine (H), dubine (H) i dužine između okomica (L_{pp}) te dužine paralelnog srednjaka (L_c) i dužine između okomica (L_{pp}).

Tablica 5.1: Odnos širine i duljine između osnovica za različite tipove brodova [1]

B/L_{pp}	bulker	container	ferry	tanker
MIN	0.14	0.13	0.13	0.14
MAX	0.18	0.18	0.21	0.18

Tablica 5.2: Odnos gaza i dubine za različite tipove brodova [1]

D/H	bulker	container	ferry	tanker
MIN	0.44	0.46	0.33	0.50
MAX	0.63	0.70	0.68	0.59

Tablica 5.3.: Odnos dubine i duljine između okomica za različite tipove brodova [1]

H/L_{pp}	bulker	container	ferry	tanker
MIN	0.09	0.09	0.09	0.08
MAX	0.14	0.13	0.18	0.13

Tablica 5.4.: Odnos duljine paralelnog srednjaka i duljine između osnovica za različite tipove brodova [1]

L_c/L_{pp}	bulker	container	ferry	tanker
MIN	0.06	0.00	0.00	0.00
MAX	0.32	0.08	0.19	0.36

Osim odnosa duljina, bitan parametar je i koeficijent istisnine. Koeficijent istisnine biti će nešto veći za tankere i brodove za rasuti teret budući da je takvom tipu brodova porebno puno prostora za prijevoz tereta.

Tablica 5.5.: Maksimalni i minimalni koeficijenti istisnine za različite tipove brodova [1]

C_b	bulker	container	ferry	tanker
MIN	0.74	0.59	0.56	0.76
MAX	0.85	0.75	0.71	0.85

Bitan odnos dimenzija je i x-položaj početka paralenog srednjaka sa duljinom između osnovica. Ovaj koeficijent imati će velik utjecaj na otpor broda, a posljedično tome i brzinu istoga – trajekti imaju najniže vrijednosti.

Tablica 5.6.: odnos koeficijenata koji iskazuju omjer početnog položaja paralelnog srednjaka i duljine između osnovica za različite tipove brodova [1]

$x_{StartCylinder}/L_{pp}$	bulker	container	ferry	tanker
MIN	0.39	0.44	0.39	0.44
MAX	0.50	0.50	0.43	0.53

Kada govorimo o parametrizaciji broskog trupa, geometrijske krivulje smatramo najlakšima za modeliranje. Za konstrukciju novog broskog trupa, potrebno je modificirati poznate parametre kako bi isti definirali njegovim karakterističnim krivuljama – glavnog rebra, uzdužne konture broda, krivulje ravnog dna, ravnog boka i projektne vodne linije.

U nastavku rada slijedi opis definiranja nove forme polazeći od poznate te određivanje prikladnog raspona varijacija svakog pojedinog parametra.

5.2. Glavno rebro

Glavno rebro je element broda koji se nalazi na sredini broda između krmenog i pramčanog perpendikulara. Obično se za taj presjek smatra da je najširi i najveće površine, iako to ne mora nužno biti tako. Parametri koji direktno utječu na krivulju glavnog rebra jesu uzvoaj, širina, gaz, nagib dna i nagib boka.

Uzvoaj može poprimiti kružni ili eliptični oblik. Kako bi bili pokriveni svi tipovi uzvoaja, umjesto radijusa, isti ćemo definirati visinom, širinom, koeficijentom površine i omjerima širine i visine.

Kod kontejnerskih brodova, širina uzvoja biti će uvijek veća od visine. Time povećavamo teretni prostor.

Tablica 5.7: Glavno rebro – elementi uzvoja [1]

Parameter	GENERAL		Bulkler		Container		Ferry		Tanker	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
b_H [m]	1.630	10.010	1.800	4.870	1.630	10.010	1.700	5.200	2.220	7.710
b_W [m]	1.600	11.730	1.600	6.380	2.600	8.800	2.000	8.280	2.270	11.730
<i>coef fbilge</i>	0.700	0.982	0.700	0.943	0.790	0.941	0.780	0.903	0.856	0.982

Tablica 5.8.: Omjer visine i širine uzvoja [1]

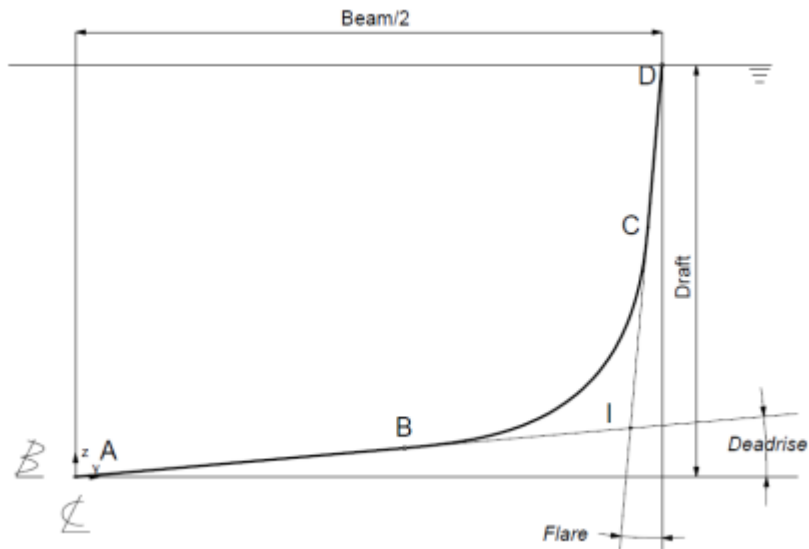
b_w/b_h	bulker	container	ferry	tanker
MIN	0.89	1.00	0.89	1.02
MAX	1.31	2.44	1.59	1.65

Tablica 5.9: Vrijednosti nagiba [1]

<i>flare</i>	bulker	container	ferry	tanker
MIN	0.00	0.00	0.00	0.00
MAX	0.00	0.00	11.00	0.52

Za sve promatrane tipove brodova pretpostavit ćemo da je nagib dna jednak nuli, a nagib boka prikazan je u tablici 5.9.

Kod razvijanja novog modela potrebno je pomoću prethodno navedenih parametara, unutar zadanih ograničenja definirati točke A, B, C i D prikazane na slici 2.1.



Slika 5.1: Krivulja glavnog rebra sa karakterističnim točkama [1]

Za ovaj primjer, pretpostavljeno je da se glavno rebro nalazi na početku paralelnog srednjaka, nagib boka se mjeri na projektiranoj vodenoj liniji te nije razmatrana mogućnost postojanja kobilice.

Prije određivanja točaka glavnog rebra, potrebno je odrediti i koordinate točke I, koja je pomoćna točka (formule 5.1. i 5.2.)

$$z_I = \frac{(B/2) - (\tan(\text{flare}) \times \text{height})}{\cos(\text{deadrise}) - (\tan(\text{flare}) \times \sin(\text{deadrise}))} \times \sin(\text{deadrise}) \quad (5.1.) [1]$$

$$y_I = \frac{(B/2) - (\tan(\text{flare}) \times \text{height})}{\cos(\text{deadrise}) - (\tan(\text{flare}) \times \sin(\text{deadrise}))} \times \cos(\text{deadrise}) \quad (5.2.) [1]$$

Uvrštavanjem parametara u funkciju za svaku pojedinu točku, dobijamo koordinate glavnog rebra novog modela (tablica 5.10.).

Tablica 5.10. : Točke krivulje glavnog rebra novog modela određene parametrima [1]

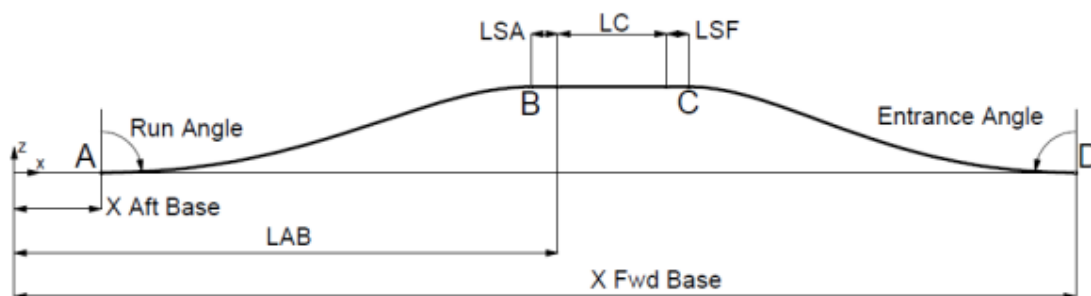
Point	Point name	Y [m]	Z [m]
A	onKeel	0	0
B	onLowerBilge	$y_I - b_W$	$\tan(\text{deadrise}) \times (y_I - b_W)$
C	onFOS	$(B/2) - \tan(\text{flare}) \times (H - D) - \tan(\text{flare}) \times (D - z_I - b_H)$	$z_I + b_H$
D	onDWL	$(B/2) - \tan(\text{flare}) \times (H - D)$	D

5.3. Krivulja ravnog dna

Krivulja radnog dna (engl.flat of bottom; krat. FOB) podudara se sa doljnjom vodenom linijom broda. Povezana je sa uzdužnom konturom broda budući da se njezine kritične točke podudaraju s početkom i krajem linije kobilice. Maksimalna vrijednost y koordinate definirana je sa najnižom točkom uzvoja.

Parametri krivulje ravnog dna:

- duljina iza paralelnog srednjaka - $C_{\text{FOBstraightaft}}$
- duljina ispred paralelnog srednjaka - $C_{\text{FOBstraightfwd}}$
- ulazni kut krivulje ravnog dna - C_{FOBfwd}
- kut kretanja krivulje ravnog dna - C_{FOBaft}
- koeficijent punoće krmenog područja - $C_{\text{FOBfullnessaft}}$
- koeficijent punoće pramčanog područja - $C_{\text{FOBfullnessfwd}}$



Slika 5.2.: Krivulja ravnog dna [1]

Tablica 5.11: Parametri koji definiraju krivulju ravnog dna te njihovi minimumi i maksimumi za različite tipove brodova [1]

Parameter	GENERAL		Bulkier		Container		Ferry		Tanker	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
$C_{FO\text{Saft}}$	-0.164	0.806	0.218	0.806	-0.081	0.275	-0.164	0.373	0.217	0.610
$C_{FO\text{Sfwd}}$	0.121	0.817	0.121	0.687	0.389	0.817	0.524	0.817	0.217	0.393
$C_{FO\text{SaftHeight}}$	0.412	1.000	0.720	1.000	0.739	1.000	0.412	1.000	1.000	1.000
$C_{FO\text{SmergeAft}}$	0.000	0.721	0.116	0.392	0.191	0.521	0.000	0.632	0.296	0.721
$C_{FO\text{SmergeFwd}}$	0.000	1.325	0.000	0.852	0.181	0.880	0.210	0.552	0.227	1.325
$C_{FO\text{SstraightAft}}$	0.000	0.262	0.000	0.262	0.000	0.100	0.000	0.029	0.000	0.139
$C_{FO\text{SstraightFwd}}$	0.000	0.325	0.000	0.220	0.000	0.046	0.000	0.002	0.000	0.325
$FO\text{Sentrance} [^\circ]$	-90.000	90.000	0.000	90.000	3.150	90.000	0.000	90.000	-90.000	65.380
$FO\text{Srun} [^\circ]$	90.000	251.500	90.000	251.500	90.770	152.440	95.000	180.000	90.000	168.390

Krivulja ravnog dna određena je trima segmentima – jednim linearnim na području paralelnog srednjaka te zakrivljenim linijama u području krme i pramca broda (Tablica 5.14.) U sljedećoj tablici (Tablica 5.12.) parametri su definirani formulama pomoću kojih određujemo točke novog modela (Tablica 5.13).

Tablica 5.12: Parametri krivulje ravnog dna [1]

Parameter	Definition	Explanation	Default
$C_{FO\text{Baft}}$	$\frac{X_{aftBase}}{L_{AB}}$	x position of the aft point of the FOB	0.16
$C_{FO\text{Bfwd}}$	$\frac{X_{fwdBase} - L_{AB} - L_c}{L_{FB}}$	x position of the forward point of the FOB	0.94
$C_{FO\text{BstraightAft}}$	$\frac{L_{SA}}{L_{AB}}$	Length of the aft linear segment on the aft of the parallel midbody	0.00
$C_{FO\text{BstraightFwd}}$	$\frac{L_{SF}}{L_{FB}}$	Length of the fwd linear segment on the fore of the parallel midbody	0.00
$FO\text{Brun}$	-	Run angle of the FOB [°]	90.00
$FO\text{Bentrance}$	-	Entrance angle of the FOB [°]	90.00
$FO\text{BfullnessAft}$	$\frac{AreaCurvedAft}{z_B \times (x_B - x_A)}$	Area coefficient of the aft curved segment of the FOB	0.40
$FO\text{BfullnessFwd}$	$\frac{AreaCurvedFwd}{z_C \times (x_D - x_C)}$	Area coefficient of the forward curved segment of the FOB	0.50

Tablica 5.13.: Točke krivulje ravnog dna [1]

Point	Point name	X [m]	Z [m]
A	onXaftBase	$C_{FO\text{Baft}} \times L_{AB}$	0
B	onFOBstraightAft	$L_{AB} - (C_{FO\text{BstraightAft}} \times L_{AB})$	$\tan(\text{deadrise}) \times (y_I - b_W)$
C	onFOBstraightFwd	$L_{AB} + L_C + (C_{FO\text{BstraightFwd}} \times L_{FB})$	$\tan(\text{deadrise}) \times (y_I - b_W)$
D	onXfwdBase	$L_{AB} + L_C + (C_{FO\text{Bfwd}} \times L_{FB})$	0

Tablica 5.14.: Segmenti krivulje ravnog dna [1]

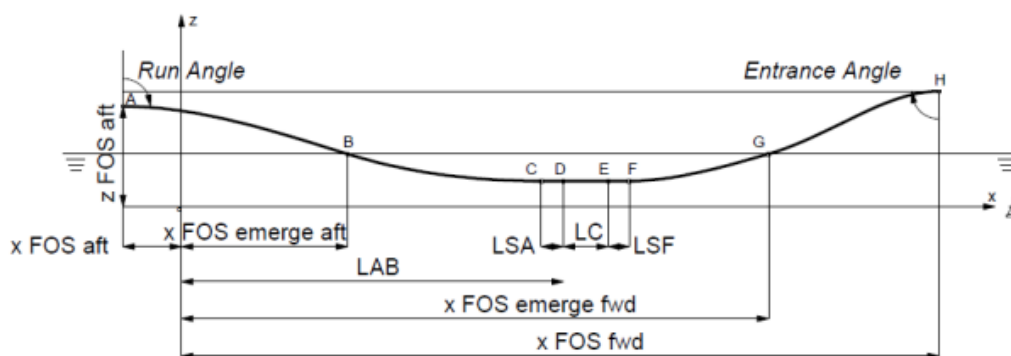
Curve Name	First Point	Second Point	Type of curve
FOBaft	A	B	F-Spline
FOBstraight	B	C	Line
FOBfwd	C	D	F-Spline

5.4. Krivulja ravnog boka

Krivulja ravnog boka (engl.Flat of the Side, krat. FOS) podudara se sa uzdužnom linijom na maksimalnoj širini broda. Krivulja se ponaša vrlo slično krivulji ravnog dna. Točke ekstrema dodiruju liniju palube i krmenog zrcala.

Parametri krivulje ravnog boka:

- C_{FOSaft} – relacija između x -položaja krme i dužine krmenog dijela
- C_{FOSfwd} – relacija između x - položaja pramca i dužine pramčanog dijela
- $C_{FOSaftHeight}$ – relacija između z -položaja krme i visine
- $C_{FOSemergeAft}$ – opisuje točku sjecišta krivulje ravnog boka i vodene linije na krmenoj strani
- $C_{FOSemergeFwd}$ – opisuje točku sjecišta krivulje ravnog boka i vodene linije na pramčanoj strani
- $C_{FOSstraightAft}$ - duljina krmenog segmenta ravne linije na krmenom dijelu paralelnog srednjaka
- $C_{FOSstraightFwd}$ – duljina pramčanog segmenta ravne linije boka na pramčanom dijelu paralelnog srednjaka



Slika 5.3.: Krivulja ravnog boka [1]

Tablica 5.15. : Parametri koji definiraju krivulju ravnog boka te njihovi minimumi i maksimumi za različite tipove brodova [1]

Parameter	GENERAL		Bulker		Container		Ferry		Tanker	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
C_{FOSaft}	-0.164	0.806	0.218	0.806	-0.081	0.275	-0.164	0.373	0.217	0.610
C_{FOSfwd}	0.121	0.817	0.121	0.687	0.389	0.817	0.524	0.817	0.217	0.393
$C_{FOSaftHeight}$	0.412	1.000	0.720	1.000	0.739	1.000	0.412	1.000	1.000	1.000
$C_{FOSemergeAft}$	0.000	0.721	0.116	0.392	0.191	0.521	0.000	0.632	0.296	0.721
$C_{FOSemergeFwd}$	0.000	1.325	0.000	0.852	0.181	0.880	0.210	0.552	0.227	1.325
$C_{FOSstraightAft}$	0.000	0.262	0.000	0.262	0.000	0.100	0.000	0.029	0.000	0.139
$C_{FOSstraightFwd}$	0.000	0.325	0.000	0.220	0.000	0.046	0.000	0.002	0.000	0.325
$FOS_{entrance}$ [°]	-90.000	90.000	0.000	90.000	3.150	90.000	0.000	90.000	-90.000	65.380
FOS_{run} [°]	90.000	251.500	90.000	251.500	90.770	152.440	95.000	180.000	90.000	168.390

U slučajevima kada je C_{FOSaft} negativan krivulja ravnog boka će vjerojatno završavati na krmenom zrcalu. To je slučaj kod nekih kontejneraša i trajekata kojiima treba veći krmeni prostor za teret. Kod tankera i brodova za rasuti teret obično je manji koeficijent na pramcu. Kako bi modelirali krivulju ravnog boka pomoću parametara trebamo odrediti točke A,B,C,D,E,F,G i H (Slika 5.3.). Krivulja je određena sa pet segmenata – dvije krivulje na pramčanom dijelu, dvije krivulje na krmenom dijelu i jedna ravna linija na području paralelnog srednjaka (Tablica 5.17.).

Tablica 5.16.: Točke krivulje ravnog boka [1]

Point	Point name	X [m]	Z [m]
A	onFOSaft	$C_{FOSaft} \times L_{AB}$	$C_{FOSaft} \times H$
B	onFOSemergeAft	$C_{FOSemergeAft} \times (L_{AB} - x_{FOSaft} - L_{SA}) + x_{FOSaft}$	D
C	onFOSstraightAft	$L_{AB} - L_{SA}$	$z_I + b_H$
D	onStartCylinder	L_{AB}	$z_I + b_H$
E	onEndCylinder	$L_{AB} + L_C$	$z_I + b_H$
F	onFOSstraightFwd	$L_{AB} + L_C + L_{SF}$	$z_I + b_H$
G	onFOSemergeFwd	$C_{FOSemergeFwd} \times (x_{FOSfwd} - L_{AB} - L_C - L_{SF}) + (L_{AB} + L_C + L_{SF})$	D
H	onFOSfwd	$L_{AB} + L_C + (C_{FOSfwd} \times L_{FB})$	H

Tablica 5.17. : Segmenti krivulje ravnog boka [1]

Curve Name	First Point	Second Point	Type of curve
FOSaftDry	A	B	F-Spline
FOSaftWet	B	C	F-Spline
FOSstraight	C	F	Line
FOSfwdWet	F	G	F-Spline
FOSfwdDry	G	H	F-Spline

5.5. Projektna vodena linija (engl. Design Water Line, DWL)

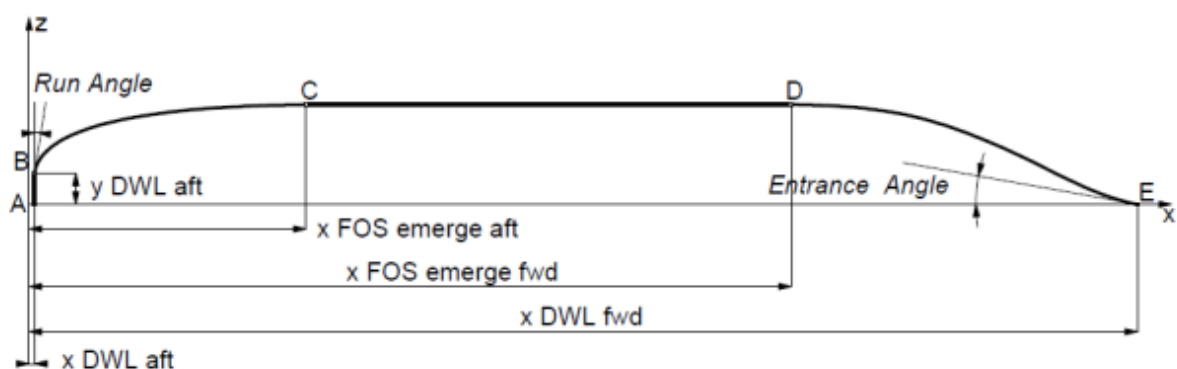
Kao i kod ostalih elemenata broskog trupa, za definiranje projektne vodene linije novog modela potrebno je odrediti parametre i njihov raspon vrijednosti.

Parametri krivulje projektne vodene linije:

- $C_{DWLaftX}$ – x položaj krmene točke projektne vodene linije
- $C_{DWLaftY}$ – y položaj krmene točke projektne vodene linije
- $C_{DWLfwdX}$ – x položaj pramčane točke projektne vodene linije
- $DWL_{fullnessAft}$ – koeficijent površine krivulje vodene linije – krmeni dio
- $DWL_{fullnessFwd}$ – koeficijent površine krivulje vodene linije – pramčani dio
- $DWL_{entrance}$ - ulazni kut krivulje projektne vodene linije
- DWL_{run} – kut kretanja krivulje projektne vodene linije

Tablica 5.18. : Parametri krivulje projektne vodene linije i njihovi rasponi

Parameter	GENERAL		Bulkier		Container		Ferry		Tanker	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
$C_{DWLaftX}$	-0.164	0.033	-0.046	0.032	-0.069	0.021	-0.164	-0.014	-0.048	0.033
$C_{DWLaftY}$	0.000	1.000	0.000	0.429	0.000	0.612	0.000	1.000	0.000	0.081
$C_{DWLfdwX}$	0.812	1.049	0.812	1.002	1.000	1.017	0.996	0.996	1.000	1.049
$DWL_{fullnessAft}$	0.637	1.000	0.698	0.736	0.637	0.870	0.656	1.000	0.701	0.831
$DWL_{fullnessFwd}$	0.564	0.841	0.700	0.780	0.570	0.693	0.564	0.696	0.698	0.841
$DWL_{entrance} [^\circ]$	4.000	90.000	71.530	90.000	9.670	90.000	4.000	76.000	47.360	90.000
$DWL_{run} [^\circ]$	0.000	90.000	51.450	67.260	0.000	75.340	0.000	90.000	3.000	59.070



Slika 5.4.: Krivulja projektne vodene linije [1]

Tablica 5.19.: Parametri krivulje projektne vodene linije [1]

Parameter	Definition	Explanation	Default
$C_{DWLaftX}$	$\frac{x_{DWLaft}}{L_{AB}}$	x position of the aft point of the DWL	0.01
$C_{DWLaftY}$	$\frac{y_{DWLaft}}{B/2}$	y position of the aft point of the DWL	0.00
$C_{DWLfdwX}$	$\frac{x_{fDWLfdw} - L_{AB} - L_c}{L_{FB}}$	x position of the forward point of the DWL	1.00
DWL_{run}	-	Run angle of the DWL [°]	0.00
$DWL_{entrance}$	-	Entrance angle of the DWL [°]	10.00
$DWL_{fullnessAft}$	$\frac{Area_{CurvedAft}}{(C_{DWLaftY} \times B/2) \times (x_{FOSemergeAft} - x_{DWLaftX})}$	Area coefficient of the aft curved segment of the DWL	0.85
$DWL_{fullnessFwd}$	$\frac{Area_{CurvedFwd}}{(B/2) \times (x_{DWLfdwX} - x_{FOSemergeFwd})}$	Area coefficient of the forward curved segment of the DWL	0.63

Kako bi projektirali vodnu liniju za novi model, potrebno je odrediti točke (Slika 5.4.) pomoću unaprijed zadanih parametara.

Tablica 5.20. : Točke krivulje projektne vodene linije [1]

Point	Point name	X [m]	Z [m]
A	onCPC	$C_{DWLaftX} \times L_{AB}$	0
B	onDWLaft	$C_{DWLaftX} \times L_{AB}$	$C_{DWLaftY} \times (B/2)$
C	onFOSeMergeAft	$C_{FOSeMergeAft} \times L_{AB}$	$(B/2) - \tan(\text{flare}) \times (H - D)$
D	onFOSeMergeFwd	$(C_{FOSeMergeFwd} \times L_{FB}) + L_{AB} + L_C$	$(B/2) - \tan(\text{flare}) \times (H - D)$
E	onDWL fwd	$C_{DWL fwd X} \times L_{FB}$	0

Tablica 5.21: Segmenti krivulje projektne vodene linije [1]

Curve Name	First Point	Second Point	Type of curve
DWLaft1	A	B	Line
DWLaft2	B	C	F-Spline
DWLstraight	C	D	Line
DWL fwd	D	E	F-Spline

5.6. Linija palube (Deck line)

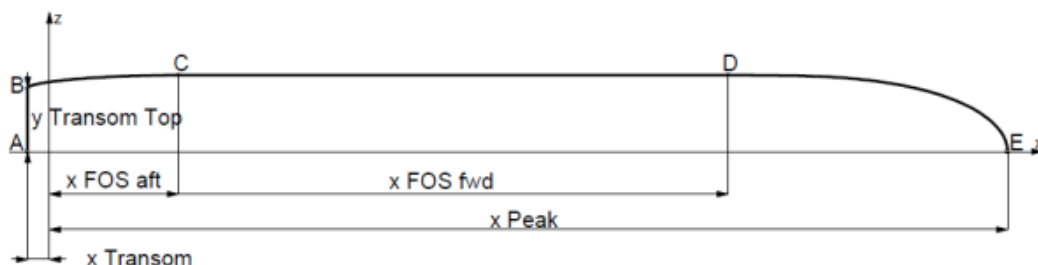
Kada govorimo o liniji palube, linija na pramčanoj strani je kod različitih tipova brodova uglavnom ista. Razlikujemo dva segmenta (linerni i zakrivljeni) čije su ekstremne vrijednosti jednake kao kod krivulje ravnog boka. Krmeni dio linije palube podložniji je promjenama. Određena je krivljom krmenog zrcala i krivljom ravnoga boka.

Parametri linije palube:

- C_{peak} – kod kontejneraša i trajekata primjećujemo najveće vrijednosti budući da je potrebno više prostora na palubi za prijevoz tereta
- $\text{deck}_{\text{fullnessAft}}$
- $\text{deck}_{\text{fullnessFwd}}$

Tablica 5.22: Parametri linije palube i raspon njihovih vrijednosti [1]

Parameter	GENERAL		Bulker		Container		Ferry		Tanker	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
C_{Peak}	1.006	1.204	1.015	1.110	1.042	1.122	1.023	1.204	1.006	1.164
$deck_{fullnessAft}$	0.627	1.000	0.644	0.806	0.686	1.000	0.627	1.000	0.709	0.779
$deck_{fullnessFwd}$	0.620	0.861	0.761	0.824	0.620	0.850	0.630	0.780	0.753	0.861



Slika 5.5.: Krivulja linije palube [1]

Tablica 5.23.: Parametri linije palube [1]

Parameter	Definition	Explanation	Default
C_{Peak}	$\frac{x_{Peak} - L_C - L_{AB}}{L_{FB}}$	x position of the forward point of the deck line	1.12
$deck_{fullnessAft}$	$\frac{AreaCurvedAft}{(x_{FOSaft} - x_{Transom}) \times (B - L_{TransomPanelTop})}$	Area coefficient of the aft curved segment of the deck line	0.85
$deck_{fullnessFwd}$	$\frac{AreaCurvedFwd}{(x_{peak} - x_{FOSfwd}) \times B}$	Area coefficient of the forward curved segment of the Deck Line	0.73

Za modeliranje linije palube novog projekta, potrebno je odrediti točke A, B, C, D i E na osnovu parametara.

Tablica 5.24.: Točke linije palube [1]

Point	Point name	X [m]	Z [m]
A	onSLP	$C_{XT\text{ransom}} \times L_{AB}$	0
B	onTransom	$C_{XT\text{ransom}} \times L_{AB}$	$C_{T\text{ransomTopY}} \times (B/2)$
C	onDeckStraightAft	$C_{FOS\text{aft}} \times L_{AB}$	$B/2$
D	onDeckStraightFwd	$L_{AB} + L_C + (C_{FOS\text{fwd}} \times L_{FB})$	$B/2$
E	onPeak	$L_{AB} + L_C + (C_{Peak} \times L_{FB})$	0

Tablica 5.25...: Segmenti linije palube [1]

Curve Name	First Point	Second Point	Type of curve
DeckTransom	A	B	Line
Deckaft	B	C	F-Spline
Deckstraight	C	D	Line
Deckfwd	D	E	F-Spline

5.7. Linija uzdužne konture

Analizom linije uzdužne konture možemo odrediti oblik pramca i krme. Linija ima dodirne točke sa već obrađenim krivuljama ravnog dna i krivuljom linije palube. Kako bi ju u cjelosti opisali, u nastavku će biti kratko opisan stem, bulb i krmeno zrcalo.

5.7.1. Pramčana statva (Stem)

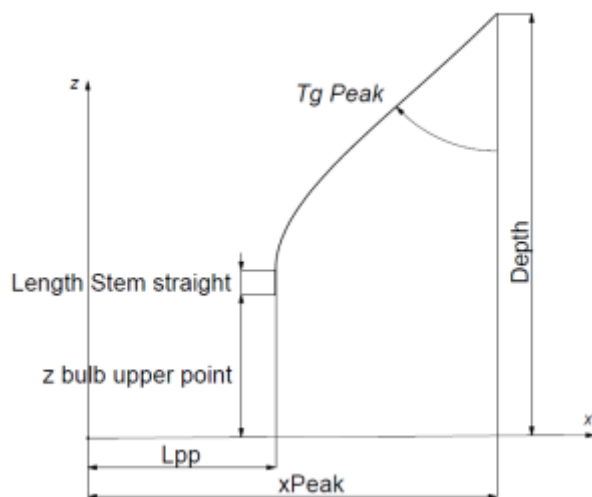
Paramčana statva je najviši prednji dio uzdužne konture. Na pramčanoj statvi se sastaju elementi strukture dna sa vojevima bočne oplata. Nema utjecaj na hidrodinamičko i hidrostatičko ponašanje broda budući da nije dio potopljenog trupa.

Parametri krivulje pramčane statve:

- $C_{\text{StemStraight}}$ – veza između duljine linearnog segmenta pramčane statve i dubine broda
- Tg_{Bulb}
- Tg_{Peak}

Tablica 5.26.: Parametri pramčane statve i raspon vrijednosti [1]

Parameter	GENERAL		Bulker		Container		Ferry		Tanker	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
$C_{stemStraight}$	0.000	0.102	0.000	0.102	0.000	0.042	0.000	0.056	0.000	0.000
$TgBulb$	78.000	178.220	90.000	173.500	78.000	161.810	80.000	90.000	174.560	178.220
$TgPeak$	10.000	49.500	10.000	42.840	33.000	45.000	23.150	49.500	19.140	44.090



Slika 5.6.: Krivulja pramčane statve [1]

Tablica 5.27.: Parametri krivulje pramčane statve [1]

Parameter	Definition	Explanation	Default
$C_{StemStriaight}$	<u>length of the linear segment</u> D	Length of the straight line segment of the stem	0
$Tgbulb$	-	Tangent angle at the top beginning of the bulb longitudinal contour	80
$TgPeak$	-	Tangent angle at the peak	45

Kao i za prethodne elemente, za izradu novog modela potrebno je odrediti točke krivulje pomoću parametara.

Tablica 5.28.: Točke krivulje pramčane statve [1]

Point	Point name	X [m]	Z [m]
A	onBulb	$L_{pp} \times (1 + C_{moveBulb})$	$C_{hb} \times D$
B	onLinear	$L_{pp} \times (1 + C_{moveBulb})$	$(C_{hb} + C_{StemStriaight}) \times D$
C	onPeak	$L_{AB} + L_C + (C_{Peak} \times L_{FB})$	D

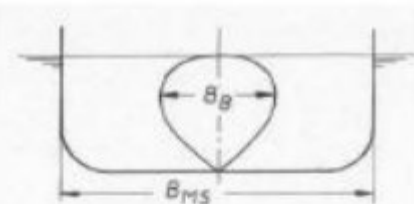
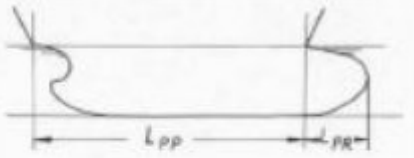
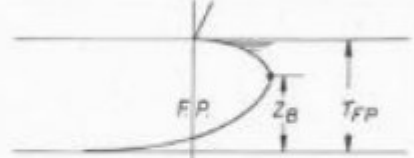
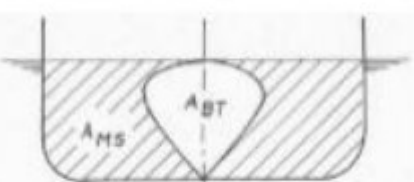
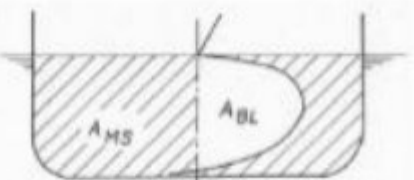

Tablica 5.29.: Segmenti krivulje pramčane statve [1]

Curve Name	First Point	Second Point	Type of curve
StemLinear	A	B	Line
StemCurved	B	C	F-Spline

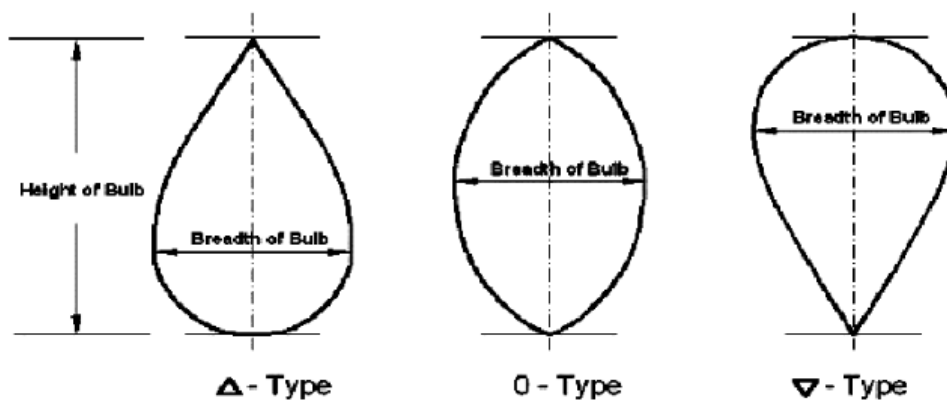
5.7.2. Pramčani bulb

Pramčani bulb sa svojim strukturnim rasporedom mora biti integriran u prostor pramčanog pika. Njegova geometrija utječe na otpor valova i samu učinkovitost propulzije što ga čini važnim elementom trupa kada govorimo o hidrodinamici broda.

Pramčani bulb još je 1978. analizirao Kracht. Prema Krachtu za njegovo opisivanje dovoljna su tri linearna i tri nelinearna koeficijenta prikazana na Slici 5.7. Također, podjelio ih je u tri skupine s obzirom na položaj njihovog težišta (Slika 5.8). [5]

Breadth parameter	$c_{BB} = \frac{B_B}{B_{MS}}$	
Length parameter	$c_{LPR} = \frac{L_{PR}}{L_{PP}}$	
Depth parameter	$c_{ZB} = \frac{z_B}{T_{FP}}$	
Cross area parameter	$c_{ABT} = \frac{A_{BT}}{A_{MS}}$	
Length area parameter	$c_{ABL} = \frac{A_{BL}}{A_{MS}}$	
Volumetric parameter	$c_{\nabla PR} = \frac{\nabla_{PR}}{\nabla_{WL}}$	

Slika 5.7.: Koeficijenti dostatni za opis bulba prema Krachtu [5]



Slika 5.8.: Tipovi pramčanog bulba spomenuti u radu (1.,2.,3.) [6]

Prvi tip pramčanog bulba je najčešće korišten za spore brodove, kao što su tankeri ili brodovi za prijevoz rasutog tereta. S druge strane, za brže brodove najčešće se koristi treći tip (Slika 5.8.).

Tablica 5.30.: Raspon tipičnih vrijednosti linearnih koeficijenata (Kracht) [7]

	MIN	MAX
C_{BB}	0.170	0.200
C_{LPR}	0.018	0.031
C_{ZB}	0.260	0.550

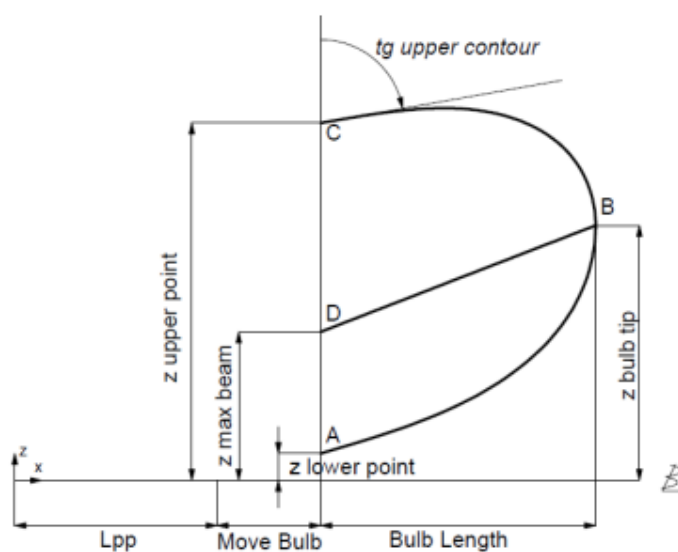
Tablica 5.31: Raspon tipičnih vrijednosti nelinearnih koeficijenata (Kracht) [7]

	MIN	MAX
C_{ABT}	0.064	0.122
C_{ABL}	0.068	0.146
C_{VPR}	0.0011	0.00272

Za modeliranje pramčanog bulba novog projekta korišteni su Krachtovi koeficijenti, ali i još nekoliko drugih (Tablica 5.32) budući da se vremenom utvrdilo kako Krachtovi koeficijenti ipak nisu dostatni za potpun opis bulba. Bitno je naglasiti, da su sve promjene površina rađene na referentnom modelu, a zatim pomaknute parametrom $C_{moveBulb}$.

Tablica 5.32.: Svi parametri potrebni za definiranje novog pramčanog bulba [1]

Parameter	Formula	Explanation	Default
C_{za}	$\frac{Z_{LowerPoint}}{D}$	z position of the lower point of the lower longitudinal contour of the bulb	0.066
C_{hb}	$\frac{Z_{UpperPoint}}{D}$	z position of the upper point of the upper longitudinal contour of the bulb	0.890
C_{hbc}	$\frac{Z_{LowerPoint}}{D}$	z position of the maximum beam on the beginning of the bulb	0.370
$C_{moveBulb}$	$\frac{offsetToFp}{L_{pp}}$	x distance between the L_{pp} and the beginning of the bulb surface	0.004
$Bulb_{lowerFullness}$	$\frac{Area_{LowerLongitudinal}}{Bulb\ Length \times (Z_{Tip} - Z_{LowerPoint})}$	Area coefficient of the lower longitudinal contour of the bulb	0.730
$Bulb_{upperFullness}$	$\frac{Area_{UpperLongitudinal}}{Bulb\ Length \times (Z_{UpperPoint} - Z_{Tip})}$	Area coefficient of the upper longitudinal contour of the bulb	1.000
$Bulb_{halfbeamFullness}$	$\frac{Area_{HalfbeamContour}}{Max_{Halfbeam} \times BulbLength}$	Area coefficient of the halfbeam distribution contour of the bulb	0.850
$Bulb_{lowerSectionFullness}$	$\frac{Area_{LowerTransversal}}{Max_{Halfbeam} \times (Z_{MaxBeam} - Z_{LowerP.})}$	Area coefficient of the lower transversal contour of the bulb	0.780
$Bulb_{upperSectionFullness}$	$\frac{Area_{LowerTransversal}}{Max_{Halfbeam} \times (Z_{UpperP.} - Z_{MaxBeam})}$	Area coefficient of the upper transversal contour of the bulb	0.780
$Tg_{upperContour}$	-	Tangent of the upper contour at the upper point of the upper longitudinal contour [°]	80.000



Slika 5.9.: Krivulja pramčanog bulba [1]

Krivulju pramčanog bulba definiramo dvije krivulje – gornju i donju te točku vrha bulba. Za njihovu definiciju, potrebno je odrediti kao i u dosadašnjim primjerima točke kroz koje krivulja prolazi. Spajanjem točaka stvaramo segmente definirane u ovom slučaju F-splineom.

Tablica 5.33.: Točke krivulje koja opisuje bulb [1]

Point	Point name	X [m]	Z [m]
A	LowerPoint	0	$C_{za} \times D$
B	BulbTip	$C_{LPR} \times L_{pp}$	$C_{zb} \times D$
C	UpperPoint	0	$C_{hb} \times D$

Tablica 5.34.: Točke krivulje koja opisuje bulb [1]

Point	Point name	X [m]	Z [m]
D	onFP	0	$C_{hbe} \times D$
B	onTip	$C_{LPR} \times L_{pp}$	$C_{zb} \times D$

Tablica 5.35.: Segmenti krivulje koja definira bulb [1]

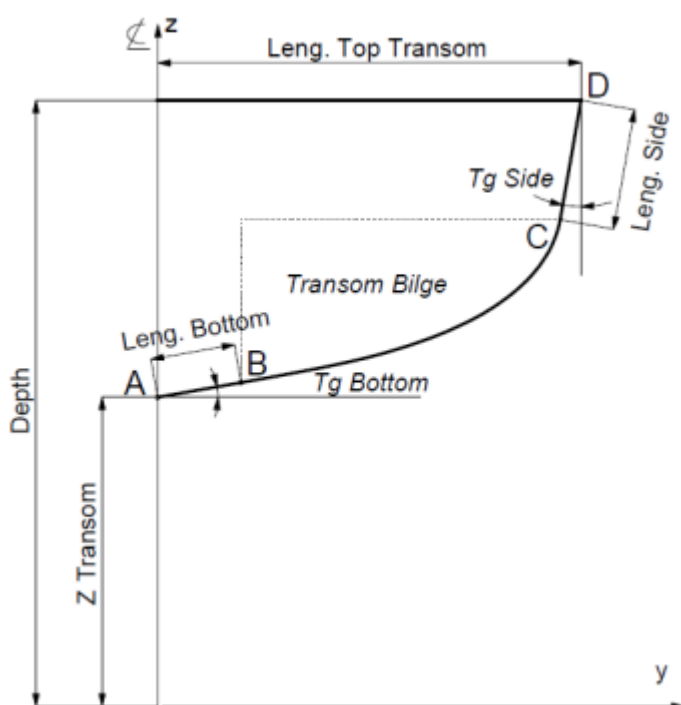
Curve Name	First Point	Second Point	Type of curve	Star Angle	End Angle
Low	A	B	F-Spline	-	0.00
Upp	C	B	F-Spline	$Tg_{upperContour}$	180.00

5.7.2. Krmeno zrcalo

Krmeno zrcalo utječe na liniju palube, uzdužnu konturu i krivulju ravnog boka. Krivulja krmene zrcala definirana je linearnim segmentom na dnu ($C_{linearBottom}$) kojeg prati zakrivljeni segment ($transom_{fullness}$) nakon kojeg opet slijedi linearni segment ovisan o krivulji ravnog boka ($C_{linearSide}$). Posljednji segment je onaj na vrhu koji se podudara sa krmnim segmentom linije palube ($C_{TransomTopY}$). Segmenti su opisani parametrima (Tablica 5.36.).

Tablica 5.36.: Parametri krmenog zrcala i raspon njihovih uobičajenih vrijednosti [1]

Parameter	GENERAL		Bulker		Container		Ferry		Tanker	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
$C_{XT_{transom}}$	-0.164	-0.027	-0.089	-0.027	-0.089	-0.040	-0.164	-0.042	-0.076	-0.042
$C_{ZT_{transom}}$	0.697	1.344	0.828	1.344	0.797	1.127	0.697	1.316	0.955	1.316
$C_{linearBottom}$	0.000	0.674	0.000	0.000	0.000	0.209	0.000	0.674	0.000	0.127
$C_{linearSide}$	0.000	0.591	0.000	0.278	0.050	0.273	0.214	0.591	0.000	0.187
$C_{T_{transom}TopY}$	0.344	1.000	0.344	0.846	0.829	1.000	0.718	1.000	0.448	0.632
$transom_{fullness}$	0.541	0.937	0.627	0.732	0.619	0.869	0.619	0.937	0.541	0.731
tg_{bottom} [°]	0.000	57.470	0.000	57.470	0.000	8.160	0.000	20.010	3.550	38.430
tg_{side} [°]	0.000	60.300	0.000	32.700	0.000	26.000	0.000	26.000	0.000	60.300
panel inclination [°]	68.520	94.070	68.520	90.000	80.630	90.000	82.000	94.070	88.680	90.000



5.10: Krivulja krmenog zrcala [1]

Kontejneraši i trajekti pokazuju najmanje vrijednosti $C_{x_{transom}}$ i $C_{z_{transom}}$ budući da kod takvog tipa broda je potreban veliki teretni prostor na krmi.

6. Zaključak

Radi brzih promjena na tržištu, sve većih i specifičnijih zahtjeva te potrebe za projektiranjem velike količine brodova bilo je potrebno razviti novu metodu modeliranja. Započinjanje projekta od nule, skupo je i dugotrajno te se inženjeri okreću parametarskom pristupu.

Parametrizacija teži ka tome da bude potpuno automatizirana metoda, a njezin temelj je određivanje bezdimenzijskih parametara pomoću kojih je moguć projekt novog broda od već postojećeg. Osim toga, isti omogućavaju usporedbu različitih brodskih oblika i varijacija, čime olakšavaju proces donošenja odluka pri projektiranju.

Ovaj rad ističe ključne aspekte vezane uz bezdimenzijske parametre forme i njihovu ulogu u modifikaciji broskog trupa kroz karakteristične krivulje kao što su glavno rebro, uzdužna kontura broda, krivulja ravnog dna, krivulja ravnog boka te projektne vodne linije. Bezdimenzijski parametri su od iznimne važnosti budući da omogućavaju razvoj novog modela iz poznate forme prototipa, pri tome je potrebno poznavati raspon vrijednosti koje isti mogu poprimiti za svaki pojedini tip broda. Isti su tablično prikazati te analizirani u svrhu boljeg razumijevanja metode. Također, razmatrane su metode optimizacije forme trupa broda s ciljem poboljšanja hidrodinamičkih karakteristika, pomorstvenosti i drugih relevantnih performansi.

Razvoj tehnologije omogućio je vrlo preciznu definiciju forme te sve bolju prilagodbu specifičnim zahtjevima. Nadalje, razvoj CFD softvera omogućuje optimizaciju uz minimalne troškove što rezultira postizanjem boljih hidrodinamičkih karakteristika i smanjenje otpora vode, a posljedično krajnji model broda ekonomičniji je i energetske učinkovitiji.

Brodogradnja je vrlo izazovno područje koje podliježe stalim promjenama, projekti danas imaju sve veći broj zahtjeva. Razumijevanje i primjena bezdimenzijskih parametara forme, karakterističnih krivulja i metoda optimizacije postaju ključ za uspjeh u struci. Daljnja istraživanja svakako će nastaviti oblikovati budućnost projektiranja, a time doprinijeti stvaranju naprednijih, sigurnijih i održivijih plovila na razini globalne industrije.

7. Literatura

- [1] Sanches - Parametric Modelling of Hull Form for Ship Optimization – diplomski rad
- [2] C. Abt, S.D. Bade, L. Birk, S. Harries - Parametric hull form design – a step towards one week ship design
- [3] Soonhung Han, Yeon-Seung Lee, Young Bok Choi - Hydrodynamic hull form optimization using parametric models
- [4] CAESES, službena web stranica FRIENDSHIP softvera - <https://www.caeses.com/about-us/>, 5.09.2023
- [5] Rafik - Hydrodynamic optimisation of a new hull bow shape by CFD code – diplomski rad
- [6] Kiryanto, Firdhaus - Study of the effect on the addition of anti-slamming bulbous bow to total resistance in tugging supply vessel using CFD
- [7] Ventura M. – Bulbous Bow Design and Construction - <https://www.scribd.com/document/72055039/SD-1-5-4-Bulbous-Bow-Design>, 7.09.2023

8. Popis oznaka i kratica

A_{WL} površina vodne linije m^2

B širina broda m

S stvarna površina ispod krivulje B-spline-a m^2

S_0 zadana vrijednost površine m^2

Q_i kut tangente, stupanj $^\circ$

K_i vektor zakrivljenosti m

F ograničenje površine m^2

L_{pp} duljina broda između osnovica m

H visina broda m

D gaz m

b_h širina uzvoja m

BM_L visina uzdužnog metacentra

9. Popis slika

Slika 2.1.: „Ship Design Spiral „ (Evans, 1959.) [1].....	7
Slika 2.2.:“Holistic Design Approach“ [1].....	8
Slika 3.1: Topološke razine [2].....	9
Slika 3.2.: Proces modeliranja trupa [2].....	11
Slika 3.3.: Parametarska krivulja optimizirana za izglađenu formu s različitim područjima ograničenja površine [3].....	14
Slika 3.4.: Primjer transformacije SAC krivulje [3].....	15
Slika 4.1.: Tehnike projektiranja u prošlosti (na vrhu), sadašnjosti (sredina) i budućnosti(dno) [1]	18
Slika 5.1: Krivulja glavnog rebra sa karakterističnim točkama [1].....	23
Slika 5.2.: Krivulja ravnog dna [1].....	24
Slika 5.4.: Krivulja projektne vodene linije [1].....	29
Tablica 5.21: Segmenti krivulje projektne vodene linije [1].....	30
Slika 5.5.: Krivulja linije palube [1].....	31
Slika 5.6.: Krivulja pramčane statve [1].....	33
Slika 5.7.: Koeficijenti dostatni za opis bulba prema Krachtu [5]	35
Slika 5.8.: Tipovi pramčanog bulba spomenuti u radu (1.,2.,3.) [6]	35
Slika 5.9.: Krivulja pramčanog bulba [1].....	37
Slika 5.10:Krivulja krmenog zrcala [1].....	39

10. Popis tablica

Tablica 3.1: Parametri oblika koji opisuju ravninsku krivulju [3]	13
Tablica 5.1: Odnos širine i duljine između osnovica za različite tipove brodova [1]	20
Tablica 5.4.: Odnos duljine paralelnog srednjaka i duljine između osnovica za različite tipove brodova [1]	20
Tablica 5.5.: Maksimalni i minimalni koeficijenti istisnine za različite tipove brodova [1]	21
Tablica 5.6.: odnos koeficijenata koji iskazuju omjer početnog položaja paralelnog srednjaka i duljine između osnovica za različite tipove brodova [1].....	21
Tablica 5.7: Glavno rebro – elementi uzvoja [1].....	22
Tablica 5.8.: Omjer visine i širine uzvoja [1]	22
Tablica 5.9: Vrijednosti nagiba [1]	22
Tablica 5.10. : Točke krivulje glavnog rebra novog modela određene parametrima [1].....	24
Tablica 5.11: Parametri koji definiraju krivulju ravnog dna te njihovi minimumi i maksimumi za različite tipove brodova [1]	25
Tablica 5.12: Parametri krivulje ravnog dna [1].....	25
Tablica 5.13.: Točke krivulje ravnog dna [1]	25
Tablica 5.14.: Segmenti krivulje ravnog dna [1]	26
Tablica 5.15. : Parametri koji definiraju krivulju ravnog boka te njihovi minimumi i maksimumi za različite tipove brodova [1].....	27
Tablica 5.16.: Točke krivulje ravnog boka [1]	28
Tablica 5.17. : Segmenti krivulje ravnog boka [1]	28
Tablica 5.18. : Parametri krivulje projektne vodene linije i njihovi rasponi	29
Tablica 5.19.: Parametri krivulje projektne vodene linije [1].....	29
Tablica 5.20. : Točke krivulje projektne vodene linije [1]	30
Tablica 5.22: Parametri linije palube i raspon njihovih vrijednosti [1].....	30
Tablica 5.23.: Parametri linije palube [1]	31
Tablica 5.24.: Točke linije palube [1]	31
Tablica 5.25.: Segmenti linije palube [1]	32
Tablica 5.26.: Parametri pramčane statve i raspon vrijednosti [1]	32
Tablica 5.27.: Parametri krivulje pramčane statve [1].....	33
Tablica 5.28.: Točke krivulje pramčane statve [1]	34
Tablica 5.29.: Segmenti krivulje pramčane statve [1]	34
Tablica 5.30.: Raspon tipičnih vrijednosti linearnih koeficijenata (Kracht) [7].....	36
Tablica 5.31: Raspon tipičnih vrijednosti nelinearnih koeficijenata (Kracht) [7].....	36

Tablica 5.32.: Svi parametri potrebni za definiranje novog pramčanog bulba [1].....	37
Tablica 5.33.: Točke krivulje koja opisuje bulb [1].....	38
Tablica 5.34.: Točke krivulje koja opisuje bulb [1].....	38
Tablica 5.35.: Segmenti krivulje koja definira bulb [1]	38
Tablica 5.36.: Parametri krmenog zrcala i raspon njihovih uobičajenih vrijednosti [1]	39

11. Sažetak

Sve kompleksniji zahtjevi na tržištu zahtjevaju konstantan razvoj metoda projektiranja. Potrebno je osigurati kvalitetu, sigurnost i dugotrajnost plovila, osiguravajući pritom poštivanje regulacija i ekonomičnost. Sve te zahtjeve potrebno je ostvariti u što kraćem vremenskom roku. Jasno je da konvencionalne metode više ne mogu biti konkurentne na tržištu, pa se razvija metoda novijeg doba – parametrizacija. Rad se temelji na opisu procesa parametrizacije uz kratku usporedbu sa ostalim metodama. Naglasak je stavljen na definiranje bezdimenzijskih parametara pomoću kojih koristeći prototip stvaramo nove modele. Stvaranje novog modela opisano je pomoću projekta određenog u FRIENDSHIP softveru. Definirani su rasponi vrijednosti u kojima parametri mogu varirati. Nadalje, objašnjeno je kako parametri definiraju NURBS plohe. Također, kako bi zahtjevi projekta bili zadovoljeni, a uz to osigurani optimalne hidrodinamičke, pomorstvene i druge performanse nužna je optimizacija. Kratko su opisane metode iste. Daljnja istraživanja svakako će nastaviti oblikovati budućnost projektiranja i time doprinijeti stvaranju naprednijih, sigurnijih i održivijih plovila na razini globalne industrije.

Ključne riječi: parametrizacija, optimizacija, bezdimenzijski koeficijenti, projektiranje, NURBS krivulje

Abstract

More and more complex requirements on the market require constant development of design methods. It is necessary to ensure the quality, safety and longevity of the vessel, while ensuring it is clear that conventional methods can no longer be competitive on the market, so a modern method is being developed by parameterization. The paper is based on the description of the parameterization process with a short comparison with other methods. Emphasis is placed on defining non dimensional parameters with which we create new models using the prototype. The creation of a new model is described using the project defined in the FRIENDSHIP software. The ranges of values in which the parameters can vary are defined. Furthermore, it is explained how the parameters define NURBS surfaces. Also, in order to meet the requirements of the project, and in addition to ensure optimal hydrodynamic, maritime and other performances, optimization is necessary. The same methods are briefly described. Further research will certainly continue to shape the future of design and thus contribute to the creation of more advanced, safer and more sustainable vessels on a global industry level.

Key words: parametrization, optimization, non dimensional, coefficients. ship design, NURBS surfaces