

*Roko Markovina, FESB, R. Boškovića b.b., Split*  
*Branko Blagojević, FESB, R. Boškovića b.b., Split*  
*Jakša Bodrožić, FESB, R. Boškovića b.b., Split*

## **MODELIRANJE FORME TRUPA SUPER BRZOG BRODA 'GLIDING WING'**

### **Sažetak**

Gliding Wing je koncept super-brzog plovila s maksimalnom postizivom brzinom preko 100 uzlova, te sposobnostima uzletanja i spuštanja na morsku površinu korištenjem efekta ekranoplova i WIG efekta (efekt tla). U ovom radu prikazan je preliminarni model forme trupa sporije verzije plovila nazvane 'Spalato', brzine približno 80 uzlova, a namijenjene transportu u Jadranskom moru. Modeliranje forme trupa 'Spalato' verzije napravljeno je pomoću trodimenzionalnog CAD sustava Maxsurf za oblikovanje površina.

*Ključne riječi: super brzi brod, Gliding Wing, modeliranje forme trupa, Maxsurf*

## **HULL FORM MODELLING OF THE SUPER-HIGH-SPEED VESSEL 'GLIDING WING'**

### **Summary**

The 'Gliding Wing' is a concept of a super-high-speed vessel with a maximum achieving speed over 100 knots and flying and landing possibilities on the sea surface, using the screen-plane and WIG (Wing-In-Ground) effect. In this paper is presented a preliminary model of a hull shape of the slower vessel variant called 'Spalato', with the speed of about 80 knots, which is intended to operate in the Adriatic Sea. The hull modeling of the 'Spalato' is done with a three-dimensional surface-modeling CAD system Maxsurf that allows a systematic experimentation and rapid optimization of any new design.

*Key words: super-high-speed vessel, Gliding Wing, hull form modeling, Maxsurf*

## 1. Uvod

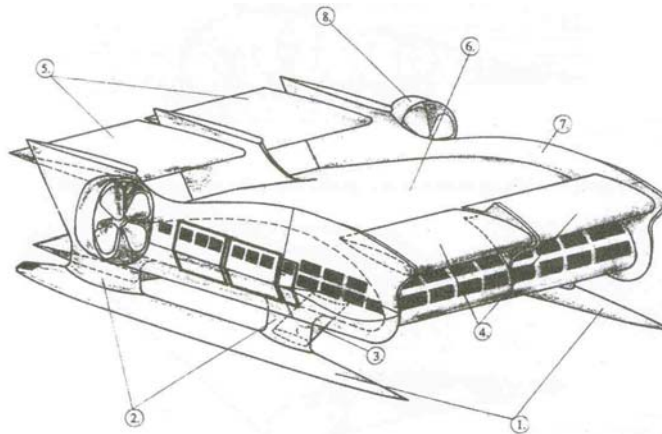
"Gliding wing" (glisirajuće krilo) je pomorsko prijevozno sredstvo čiji je originalni koncept temeljen na optimalnom iskorištavanju dva medija, vode i zraka, pomoću aerodinamičkih efekata i sile uzgona za letenje i stabilizaciju plovila, te smanjenje ukupnog otpora trupa (1). Plovila ovog tipa su zamišljena za postizanje brzina većih od 100 uzlova, a sa mogućnošću letenja korištenjem učinka tla - WIG (Wing-In-Ground), moguće bi bilo postizati i brzine od oko 250 uzlova (2). Za plovila koja koriste WIG učinak poznato je i da imaju visoki omjer uzgona i otpora prema brzini plovidbe, te znatno veću brzinu i ekonomičniju potrošnju goriva u odnosu na postojeće brze brodove (3), što jasno ukazuje na potrebu za istraživanjem i korištenjem ovog učinka kod projektiranja modernih brzih brodova nove generacije.

Prva faza razvoja plovila tipa "Gliding Wing" odnosi se na njegovu jednostavniju verziju "SPALATO", koja bi bila u stanju postizati brzine od 60 do 80 uzlova glisiranjem po morskoj površini (4). "Spalato" je plovilo nove, moderne koncepcije, koje ima originalno funkcionalnu formu u cijelosti: nadvodni dio aerodinamične forme (avionsko krilo) - potpuno izvan vode, te specijalno profilirani uronjeni dio koji osigurava uzgon. Osnovni cilj pri stvaranju forme ovakvog tipa plovila je minimalizacija otpora vode i zraka za sve režime plovidbe, što omogućava manju potrošnju goriva uz postizanje veće brzine. Stvaranje jedne tako originalne forme nezamislivo je bez primjene modernih projektnih alata – računala i specijaliziranih programa za projektiranje brodskih formi. U ovom slučaju korišten je programski paket "Maxsurf Pro" kompanije Formation Design Systems i to zbog svoje fleksibilnosti kod izrade nestandardnih formi kao i zbog primjene najmodernijih matematičkih i grafičkih metoda kao što su parametarske transformacije forme i uglašavanje površina pomoću genetičkih algoritama.

## 2. Koncept plovila "Gliding Wing" – "Spalato"

"Gliding wing" plovilo sastavljeno je od 8 glavnih konstrukcijskih grupa čija uloga je da osiguraju prostor za teret, opremu i instalacije, optimalne hidostatičke, hidrodinamičke i aerodinamičke učinke, kao i potrebnu čvrstoću i krutost čitave konstrukcije (sl. 1.):

1. podvodni dio – dvije posebno hidrostatički i hidrodinamički profilirane uronjene skije
2. bočne vertikalne aerodinamički profilirane potporne upore - najmanje četiri (dvije prednje i dvije stražnje upore)
3. prednje nakošene aerodinamički profilirane upore – najmanje 2 na prednjem dijelu trupa
4. prednja kormila
5. stražnja kormila – gornja i donja
6. nadvodni dio trupa – aerodinamički profiliran
7. bočni aerodinamični spojleri (bokovi nadvodnog dijela trupa)
8. aerodinamičke sapnice zračnih propulzora – ovisno o broju propulzora



**Slika 1.** Glavni dijelovi "Gliding Wing" trupa (5) **Fig. 1** Principal parts of the „Gliding Wing“ hull (5)

"Spalato" verzija "Gliding Wing" tipa plovila predstavlja originalno idejno rješenje za plovidbu na Jadranskom moru velikim brzinama – brzi pomorski transport na Jadranu. Ovo je prvi iz klase brodova "Gliding Wing" i ovaj brod ne koristi WIG učinak, te bi njegova optimalna brzina bila nešto manja, oko 80 uzlova, nego kod drugih varijanti planiranih u budućnosti. Cilj projektiranja ovog prvog plovila je istraživanje primjene novih materijala i specijalnih tehnologija, te izrada temeljne forme podvodnog dijela trupa iz koje će u budućnosti moći izvoditi novi oblici trupa za brža plovila.

Značajke modeliranog plovila:

Duljina:  $L_{WL} = 28,103$  m

Širina:  $B_{WL} = 19,325$  m

Gaz:  $T = 2$  m

Istisnina:  $\Delta = 153,383$  t

Teret: 80 automobila i oko 350 putnika

Brzina: 60 do 80 uzlova

Plovilo bi praktično imalo 3 režima rada različitih brzina:

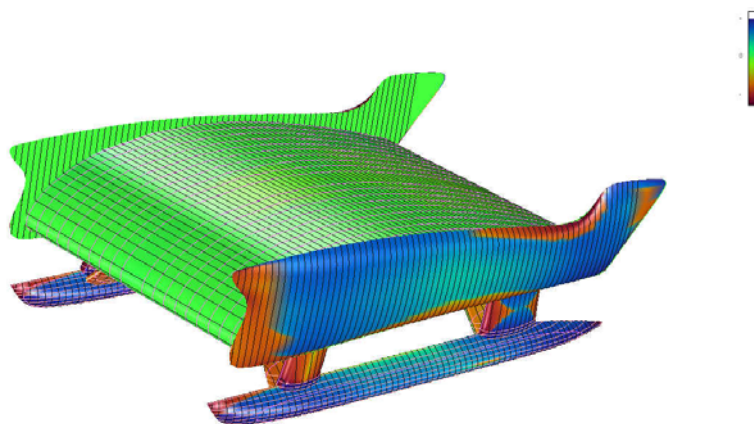
- male brzine, 1 do 35 uzlova, koristile bi se u lukama i između priobalnih otoka, zbog velikog prometa i u cilju smanjivanja buke motora, kao i na velikim valovima, za pogon se u ovom režimu plovidbe koriste pomoćni propulzijski sustavi (na skijama)
- srednje brzine, 35 do 60 uzlova, na otvorenom moru, u blizini obale, gdje je veća buka motora podnošljivija za okolinu, te gdje promet nije gust, glisirajući na malim valovima pomoću glavnog propulzijskog sustava i ploveći kroz fiksne prometne koridore
- velike brzine, 60 – 80 uzlova, na otvorenom moru, daleko od obale, glisirajući na malim valovima pomoću glavnog propulzijskog sustava.

Verzije plovila koje bi se koristile WIG učinkom imale bi i dodatni režim brzine: super velike brzine, preko 100 uzlova (do maksimalno 250), na otvorenom moru, kod većih valova (grubo more), leteći iznad površine s preletanjem objekata i otoka na moru, pomoću glavnog propulzijskog sustava.

### 3. Program Maxurf Pro

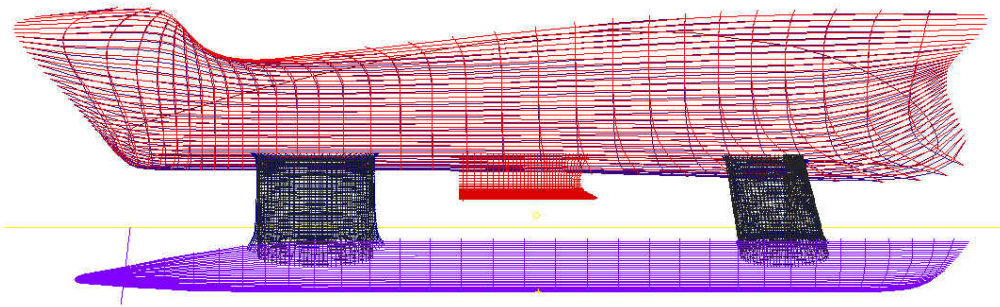
Za izradu funkcionalne "Spalato" forme upotrijebljen je program Maxsurf Pro, jedan od najmodernijih i najkompleksnijih programa za modeliranje brodskih formi danas u svijetu. Program može modelirati sve već poznate brodske forme, a ima i široke mogućnosti za izradu neuobičajenih formi plovila. U aplikaciji se nudi više vrsta površina za modeliranje, a broj površina s kojima se može raditi prilikom stvaranja novog modela, uvjetno je rečeno

neograničen. Ograničenje postoji utoliko jer se prilikom prijenosa podataka o formi u druge programe, npr. Hydromax za proračun stabiliteta, postavljaju ograničenja broja površina. Pri modeliranju "Spalato" forme upotrijebljeno je više od 30 površina. Za modeliranje oblika (površina) Maxsurf primjenjuje racionalnu B-spline formulaciju koja je opisana IGES (Initial Graphics Exchange Specification ) standardom. B-splineovi su klasa kontinuiranih parametarskih polinoma, a pripadni čvorni vektori mogu biti jednoliki ili nejednoliki (NURBs – NonUniform Rational B-Spline). Većina površina "Spalato" modela opisana je NURBs plohami. Unutar Maxsurf-a projekt se u potpunosti definira pomicanjem i pozicioniranjem velikog broja kontrolnih točaka kojima se upravlja izgledom NURBs ploha. Maxsurf koristi redove i stupce kontrolnih točaka tvoreći u prostoru mrežu kontrolnih točaka, dok kroz svaki red i stupac prolaze glatke krivulje, stvarajući prostorne krivulje, odnosno željenu površinu u procesu modeliranja. Dodavanjem redova i stupaca kontrolnih točaka na izabranu plohu, postiže se mogućnost formiranja plohe u željeni oblik. Spajanjem više površina dobiva se složeniji model. Kao pokazatelj kako manipulirati površinom koristi se Gauss-ova krivulja koja pokazuje nepravilnosti površina, njezina ispupčenja, udubljenja i ravni. Gaussova zakrivljenost pokazuje da li je površina lokalno eliptička (pozitivna zakrivljenost), da li je hiporbolna (negativna zakrivljenost) ili je razmotljiva (nulta zakrivljenost). Slika 2. prikazuje Gaussovu zakrivljenost površina za "Spalato" model. Vidljivo je da je središnji nadvodni dio trupa potpuno razmotljiva površina – Gaussova zakrivljenost u svim točkama ove površine je nula.



**Slika 2.** Zakrivljenost površina "Spalato" forme **Fig. 2** Surfaces curvature of the „Spalato“ form

Gaussova zakrivljenost kao i svojstvo razmotljivosti plohe ne garantiraju da je površina glatka (fair), zato Maxsurf nudi razne mogućnosti uglačavanja krivulja i površina. Posebno se pritom ističe funkcija uglačavanja pomoću genetskih algoritama – metoda koja je primjenjena u izradi modela "Spalato". Postupak optimizacije s genetskim algoritmom je iznimno pogodan za rješavanje problema s velikim brojem dimenzija i ograničenja, u koju kategoriju spada i problem uglačavanja površine. Ovim postupkom se postiže ne samo dobar "prolaz" modelirane površine kroz skup zadanih točaka, nego i izvrsna uglačanost površine te glatka i ravnomjerna mreža kontrolnih točaka što olakšava kasniju manipulaciju (modifikaciju površine). Modificiranje forme iz "Spalato" verzije u "pravu" "Gliding Wing" formu koja će koristiti WIG učinak relativno lako je izvedivo i zbog drugih dobrih mogućnosti Maxsurf-a – prvenstveno se to odnosi na metodu parametarske transformacije trupa. Metoda se temelji na variranju pojedinih veličina koje možemo učiniti nepromjenjivima (istisnina, duljina, širina, gaz...) i onih koje mijenjamo u odnosu na njih. Postupak variranja primjenljiv je u malim postotcima izmjena 3-5%, i to onda kada imamo male plovne objekte. Ključno je kod ovog postupka da izvedena forma zadržava glatkoću na vrlo visokom stupnju pri procesu transformacije. Sve navedene mogućnosti apsolutno opravdavaju izbor programskog paketa "Maxsurf Pro" za razvoj novih formi brzih brodova.

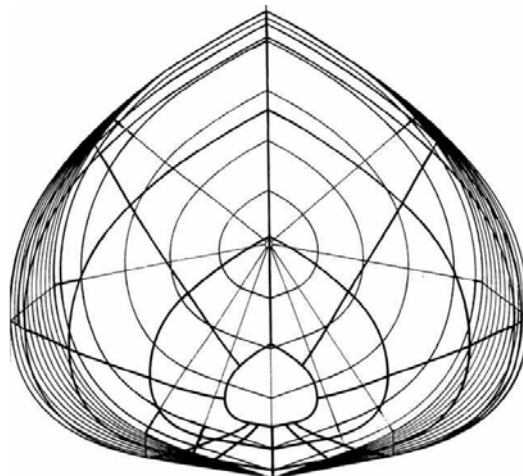


Slika 3. Mreža parametarskih krivulja modela "Spalato" Fig. 3. Parametric curves net of the „Spalato“ model

#### 4. Modeliranje forme "Spalato"

##### 4.1. Uronjeni dio trupa

Uronjeni dio trupa služi za smještaj pomoćne pogonske grupe, opreme, instalacija i balasta, ali također i za stvaranje hidrostatičke i hidrodinamičke sile uzgona potrebne za održavanje plovila na predviđenom gazu, a kod verzija plovila s WIG učinkom i zadržavanje na određenoj visini obzirom na vodenu površinu u korelaciji sa aerodinamičkim silama uzgona. Ovaj privremeno ili trajno uronjeni dio trupa ima posebno oblikovane aerodinamičke i hidrodinamičke profile koje se u prikladno nazivaju "skije". Uronjeni dio trupa ima i specijalno značenje u osiguravanju poprečnog stabiliteta zbog velikog međusobnog raspona skija. Tako zahtjevno funkcionalna forma kao i specifični uvjeti eksploatacije na moru uvjetovali su i specijalni profil rebara, tzv. "smokvasti" oblik ili "fig-form" (sl. 4.)



Slika 4. Tipična "Fig-form" rebra Figure 4. Typical „Fig-form“ stations

U jednom dijelu poprečnog presjeka oblik je blizu kružnog (kada su skije znatno uronjene u vodu) zbog potrebe najmanje oplakane površine za predviđenu istisninu. Na takav način je otpor trenja minimiziran. Duž skija poprečni presjek profila se postupno mijenja, formirajući "fig-form" rebra. Sprijeda se profil sužava, te je ovdje omjer  $B/H < 1$  uz položaj najvećeg gaza na visini  $H/2$ . Prema krmi je  $B/H > 1$  i položaj najveće širine je ispod  $H/2$  u cilju postizanja izravnatog dna, koje daje kvalitetniji efekt glisiranja kod većih brzina.

Simetrično i kontinuirano zaobljene linije profila poprečnog presjeka rebra sijeku se u ravnini simetrije. One kreiraju oštre rubove na vrhu i dnu, koji osiguravaju mali otpor forme čak i kada su skije nagnute i kada se obje kreću kroz zrak i vodu.

Oštro i učvršćeno dno, posebno prednjem dijelu, osigurava veliku krutost i sprječava moguća oštećenja u slučaju sudara s čvrstim objektima u vodi pri većim brzinama. Prednji kraj naglo završava (završava oštrije), ispod kuta od  $20^\circ$ , s položajem vrha blizu visine  $H/2$ .

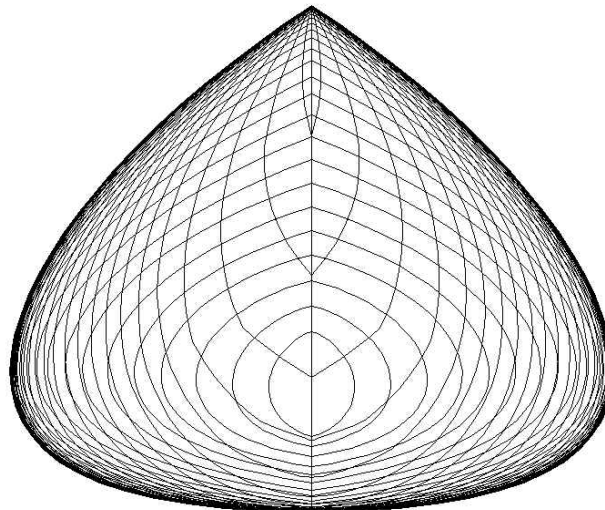
Ovo odgovara položaju najvećeg gaza profila poprečnog presjeka na prednjem kraju. Stražnji kraj završava također sa značajnim sužavanjem i malim izlaznim radijusom i sredinom ispod  $H/2$ , ali također na visini najveće debljine profila poprečnog presjeka rebra na stražnjem kraju. U slučaju oštećenja dna skije su po visini podijeljene u gornji i donji vodonepropusni prostor, a sadržavaju poprečne i uzdužne pregrade. U ovom prostoru planiran je smještaj balasta, s ciljem namještanja uzdužnog položaja težišta, kao i za namještanje "nagnutog" položaja broda kod malih brzina, kao i kod ukrcaja i iskrcaja u lukama.

Tako projektiranje skije osiguravaju:

- blagi otklon vodenih čestica pri strujanju zraka oko skija kod svih visina "z" i različitih uzdužnih nagiba broda, što rezultira u minimalnom prednjem valu i zanemarivim stražnjim vrtloženjem pri svim režimima plovidbe,
- stvaranje značajne sile hidrodinamičkog uzgona pomoću izravnatog dna na stražnjem kraju i sredini profila, pri čemu blago i postupno povećanje poprečnog presjeka smanjuje oštre udare i neugodne vibracije na većim valovima. Oblik profila na stražnjem dijelu skija (postupno sužavanje) pridonosi ovom smanjenju.

Gaz će se mijenjati kod svih operativnih brzina, a udarna opterećenja na stražnjem kraju dna regulirat će se automatskom kontrolom propulzije (automatski stabilizacijski sustav), ovisno o vjetru, valovima i promjenama brzine. Pojačani "smokvasti" oblik uronjenog stražnjeg dijela, omogućit će dobro glisanje i u slučajevima "slamminga". U svakom slučaju, "fig-form" oblik uronjenog dijela rebara, promjenjivost brzine na svim valnim uvjetima, automatska regulacija i daljinska kontrola omogućit će dobra pomorstvena svojstva broda u svim režimima rada.

Konačna forma podvodnog dijela trupa, izrađena programom Masxsurf, prikazana je na slikama 5,6,7,8 i 9.

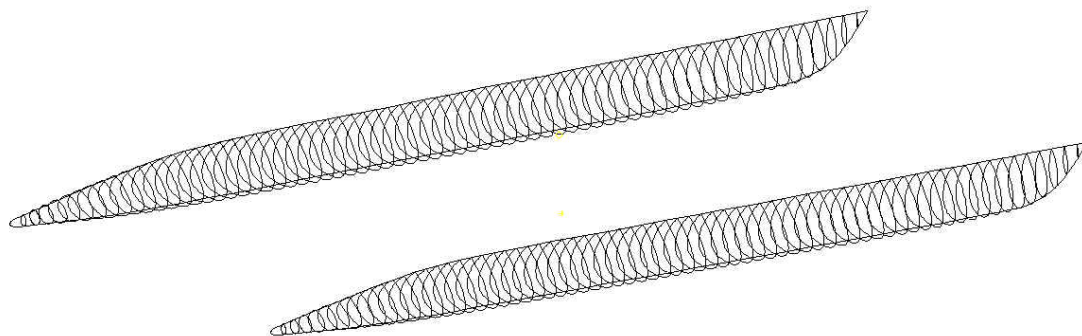


Slika 5. "Smokvasti" oblik rebara "Spalato" modela

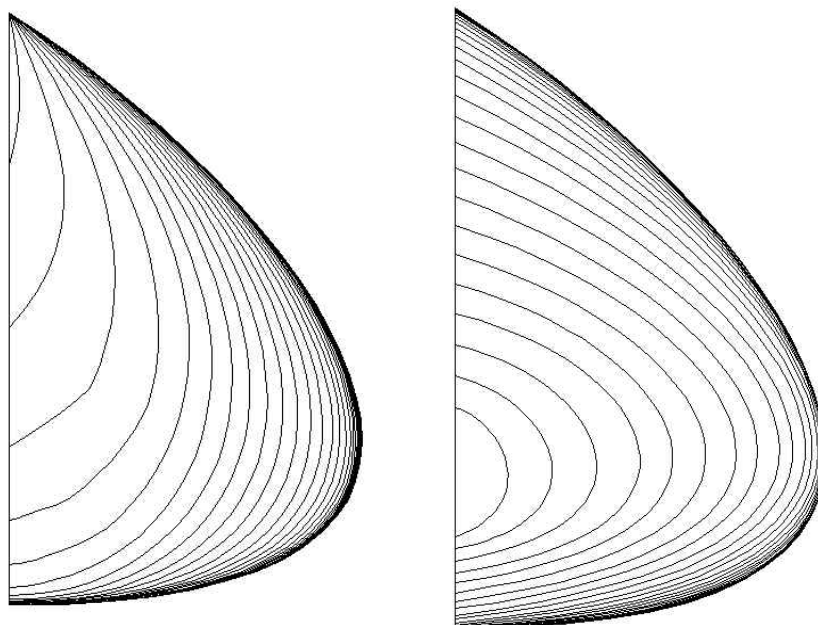
Fig. 5.



Slika 6. Vodne linije (1 skija) Fig. 6. Waterlines (1 ski)



Slika 7. Skije s rebrima, 3D prikaz Fig. 7. Skies with stations, 3D view



Slika 8. Pramčana rebra Fig. 8. Fore stations

Slika 9. Krmena rebra Fig. 9. Aft stations

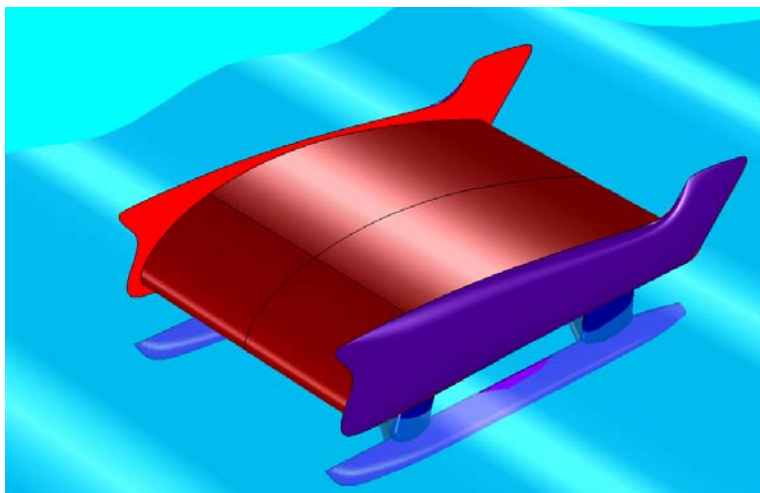
Osnovni podaci o 18 glavnih površina modela "Spalato" prikazani su u tablici 1. (rezultat proračuna programa Maxsurf) (6).

Tablica 1. Izračun glavnih površina za model "Spalato" Table 1. Main surfaces calcul. for the „Spalato“ model

SURFACE	AREA /m <sup>2</sup> /	LCG/m/	VCG /m/	I – roll /m <sup>4</sup> /	I – pitch/m <sup>4</sup> /	I – yaw/m <sup>4</sup> /
Donja ploha krila	538,388	0,726	5,207	18024,56	32891,711	50905,832
Gornja ploha krila	603,888	-4,624	8,566	21677,868	40008,565	58588,778
Pr. ploha profila	181,27	13,517	7,507	6455,502	990,936	6582,878
Bokovi	420,5	-0,215	7,62	46376,364	46261,222	89975,495
Unutrašnjost boka	405,07	-0,108	7,62	41627,325	44979,983	84123,825
Nova skija "inside"	206,261	0,021	0,856	14464,332	15987,176	30263,869
Upora "outside" pr.	27,739	9,338	3,266	2532,104	60,791	2526,993
Upora "outside" kr	41,497	-8,65	3,285	3806,661	141,878	3838,097
Upora "inside" pr.	27,739	9,338	3,266	2042,833	60,791	2037,721
Upora "inside" kr.	41,497	-8,65	3,285	3050,263	141,878	3081,699
Upora "inside"	43,345	8,505	3,323	2061,152	68,413	2022,458
Upora "outside"	31,907	10,292	3,029	1641,521	44,52	1610,158
Kosa upora krma1	52,022	-9,869	3,309	2495,345	93,09	2449,039
Kosa upora krma2	51,98	-7,511	3,307	2494,328	92,896	2448,194
Mlaznice	1,349	-16,15	0,59	109,429	0,051	109,38
Skija "outside"	206,261	0,021	0,856	19373,978	15987,175	35173,514
Novi valosjekač	17,518	-0,535	4,356	5,535	38,635	34,891
Krma valosjekača	0,84	-2,934	4,454	0,205	0,187	0,018
Total	2899,069	-0,178	5,899	208476,91	290263,632	447948,963

#### 4.2. Nadvodni dio

Nadvodni dio trupa u ovom radu nije posebno prikazan jer je za detaljno oblikovanje ovog specijalno aerodinamički profiliranog dijela trupa potrebno izvršiti analizu strujanja zraka pri većim brzinama, u cilju definiranja profila s najmanjim otporom. To nije bilo moguće izvesti trenutno raspoloživim sredstvima - Maxsurf-ov paket programa za analizu modela nije predviđen za takve proračune otpora zraka. Pored toga ovako složeni problem će osim specijaliziranih programa zahtijevati i modelska ispitivanja u zračnom tunelu. U svakom slučaju posebno profilirani NACA-profil trupa daje sigurnost da će otpor zraka pozitivno utjecati na dobivanje "besplatnog" uzgona, koji će se automatski moći regulirati, a posebno oblikovani bočni "spojleri" (umjesto krila ili polu-krila), služiti će u svrhu smanjenja inducirano otpora, tj. otpora inducirano uzgonom. Tako se, umjesto aerodinamičkog profiliranja krila, čitav trup aerodinamički profilira.

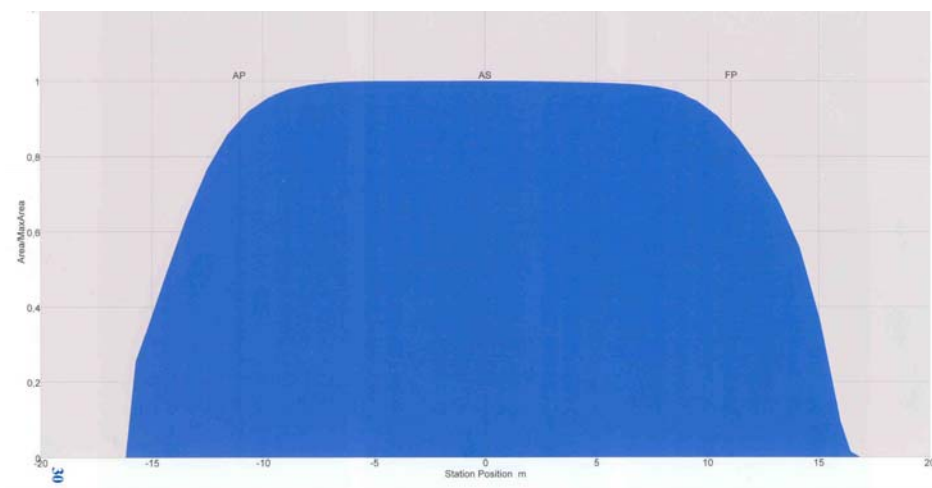


**Slika 10.** Renderirani konačni izgled modela „Spalato“ **Fig. 10.** Final rendered look of the „Spalato“ model

#### 4.3. Hidrostatske karakteristike "Spalato" modela

**Tablica 2.** Karakteristike modela "Spalato" **Table 2.** Particulars of the „Spalato“ model

Displacement	153,383 tonne	LCF from zero pt	-1,185 m
Volume	149,642 m <sup>3</sup>	KB	0,878 m
Draft to Baseline	2 m	KG	0 m
Immersed depth	2 m	BMt	9,181 m
Lwl	28,103 m	BMI	9,383 m
Beam wl	19,325 m	GMt	10,059 m
WSA	459,128 m <sup>2</sup>	GMI	10,261 m
Max.cross-section area	7,286 m <sup>2</sup>	KMt	10,059 m
Waterplane area	19,094 m <sup>2</sup>	KMI	10,261 m
Cp ( $\varphi$ )	0,731	Immersion (TPc)	0,196 tonne/cm
Cb ( $\delta$ )	0,671	MTc	0,711 tonne.m
Cm ( $\beta$ )	0,921	Density	1,025 tonne/m <sup>3</sup>
Cwp ( $\alpha$ )	0,171	RM at 1 deg = GMt.Disp.sin(1)	26,297 tonne.m
L/B	1,45	Precision	200 stations
LCB from zero pt	0,441 m		



Slika 11. Areala rebara Fig. 11. Station area curve

## 5. Zaključak

Predviđanja pokazuju da će klasični pomorski putnički prijevoz, razvijan primjenom konvencionalnih tehnologija, u skoroj budućnosti biti u značajnoj mjeri zamijenjen brzim i super-brzim plovilima nove generacije (5). "Spalato" verzija "Gliding Wing" tipa plovila je originalno idejno rješenje jednog takvog super-brzog plovila, predviđenog za prijevoz putnika na Jadranskom moru velikim brzinama, do 80 uzlova, bez WIG učinka.

Izrada forme trupa "Spalato" plovila uspješno je izvedena pomoću naprednog programskog paketa Maxsurf Pro za projektiranje i analizu brodskih formi. Primarni cilj kod izrade forme, minimizacija otpora uronjenog dijela trupa uz zadržavanje dobrih hidrostatičkih i hidrodinamičkih značajki, postignut je posebno profiliranim oblikom rebara, tzv. "fig-form" ili "smokvasti" oblik. Nadvodni dio trupa bit će izveden u obliku aerodinamičkog NACA-profila, u cilju smanjivanja otpora zraka. Tako profilirani nadvodni dio trupa služiti će i povećanju uzgona što je posebno značajno kod plovila koja koriste WIG-učinak.

"Spalato" je samo prvi korak u izradi super-brzih plovila u Republici Hrvatskoj. Daljnja istraživanja predviđena su na razvoju još bržih plovila, posebno plovila sa WIG učinkom, koja će postizati brzine i do 250 uzlova.

Ovaj rad izrađen je u sklopu znanstveno-istraživačkog projekta "Istraživanje mogućnosti razvitka plovila novih formi u hrvatskog brodogradnji" financiranog od strane Ministarstva znanosti Republike Hrvatske.

## LITERATURA

- [1] "Glisirajuće krilo" –the super-fast vessel of new generation, Dizdarević F. Markovina R., Mostar, Bosna i Hercegovina, patent, 1991.
- [2] "The role of WIG effect vehicles in the transport industry, Fast Ferry International, April 1990, 33-38.)
- [3] "The Von Karman – Gabrielli diagram analysis for the purpose of choosing the direction of the new form ships design in croatian shipbuilding, Markovina R., Marasović d., III DAAM , međunarodna konferencija o naprednim tehnologijama nerazvijenih zemalja ATDC '04, Lipanj 2004., Split, Hrvatska
- [4] "Gliding Wing, variant Spalato – the super high-speed vessel of new generation", Second Paneuropean Shipping Conference, March 2001, Split, Croatia, p.3-22
- [5] R.Markovina, "The preliminary investigations and the main principles of super-high-speed vessel "gliding wing" (conceptual design), International Shipbuilding progress, Vol.49, No. 2,2001, pp. 127-153
- [6] J.Bodrožić, "Primjena Maxsurf računalskog programa na modeliranju i analiziranju osobnosti brodskih formi ", FESB Split, lipanj 2004, Diplomski rad