

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I
BRODOGRADNJE SPLIT**

STUDIJ BRODOGRADNJE 140

OPIS FORME BRODA ZA POTREBE CFD-A

BRANKO BLAGOJEVIĆ

SPLIT, TRAVANJ 1999.

1. UVOD

Fizikalni aspekti bilo kojeg strujanja fluida opisani su s tri temeljna principa:

1. Princip očuvanja mase
2. Newton-ov drugi zakon mehanike
3. Zakon o održanju energije

Ova tri temeljna principa mogu se izraziti u obliku matematičkih jednadžbi, koje su najčešće u dane kao parcijalne diferencijalne jednadžbe.

CFD (Computational Fluid Dynamics) je znanost koja se bavi određivanjem numeričkog rješenja opisnih jednadžbi toka fluida s ciljem dobivanja numeričkog opisa cjelokupnog polja strujanja.

Stalan razvoj kompjutera od 50-tih godina doveo je do razvoja CFD-a. Ova grana dinamike fluida ujedinjuje eksperimentalnu i teorijsku dinamiku fluida dajući alternativne, jeftinije, simulacije stvarnog strujanja. Kao takva omogućuje testiranje teorijskih dostignuća u uvjetima nedostupnim eksperimentima (ograničenja snage, nesavršenost modela, utjecaj mjerila, neželjeni popratni efekti...).

CFD se bavi rješavanjem skupa jednadžbi koje opisuju strujanje bilo kojeg fluida (zrak, voda ...) oko bilo kakve geometrijske konfiguracije (krilo aviona, trup broda ...). Jednadžbe mogu opisivati stacionarna ili nestacionarna, neviskozna ili viskozna, stlačiva ili nestlačiva strujanja fluida, a uključuju i nesavršeno i reaktivno ponašanje fluida.

CFD se, stoga, koristi u raznim industrijama: za analizu i projektiranje letjelica, za projektiranje podmornica i površinskih brodova, kod projektiranja turbina, kompresora, rashladnih uređaja, ventilacije, za opisivanje strujanja kod unutarnjeg izgaranja, za simulaciju protoka krvi...

Razvitak sve moćnijih kompjutera još više unaprjeđuje CFD, tako da se danas CFD preferira u testiranju alternativnih projekata prije konačnog, ako do toga uopće dođe, eksperimentalnog testiranja.

2. KLASIFIKACIJA METODA

CFD uključuje sve proračunske metode za strujanje fluida, ali najčešće se pri tome misli na Navier-Stokesove metode.

Tablica 2. prikazuje upotrebu CFD-a u brodskoj hidrodinamici uključujući sve metode.

	Otpor broda	Propeleri i kavitacija	Pomorstvenost	Upravljivost
Metode potencijalnog strujanja	tradicionalna	tradicionalna	tradicionalna	tradicionalna
Panel metode	Moderna, utemeljena	Moderna, utemeljena	Moderna, utemeljena	Moderna, neutemeljena
Metode graničnog sloja	tradicionalna	tradicionalna	tradicionalna	—
Navier-Stokes metode	Moderna, neutemeljena	Moderna, neutemeljena	U budućnosti	U budućnosti

Tablica 2. Upotreba CFD-a u hidrodinamici broda

Metode potencijalnog strujanja su Michellova teorija otpora valova, teorija uzgonske linije kod projektiranja propelera, ili teorije odsječaka u pomorstvenosti. Posljednje dvije metode se upotrebljavaju već niz godina i mogu se smatrati razvijenim alatima.

Panel metode su naprednije i predstavljaju već utemeljene alate u proračunavanju otpora, projektiranju propelera i pomorstvenosti.

Metode graničnog sloja nisu nikad dostigle korisnost metoda potencijalnog strujanja, ali su se upotrebljavale neko vrijeme za proračune otpora, opis strujanja oko krila propelera, i kod proračuna prigušenija ljuljanja.

Moderne Navier-Stokesove metode se počinju upotrebljavati kod proračuna otpora i strujanja oko propelera. Eulerove metode igraju puno manju ulogu u hidrodinamici nego u aerodinamici. Kada se radi o proračunavanju otpora najprikladnije je odmah primijeniti Navier-Stokesove metode nego pokušati ujediniti Eulerove i metode graničnog sloja.

3. PRIMJENA I OGRANIČENJA CFD-a

3.1. Primjena CFD-a

Primjena CFD-a u brodogradnji je slijedeća:

- proračun otpora valova i viskoznog otpora (omogućuje poboljšanje oblika bulba, ramena, pramčanog dijela trupa, oblika rebara, raspodjele istisnine, veličine transoma i ravninskih klinova)
- uzgonski i inducirani otpor (poboljšavanje podvodnih krila i privjesaka na jahtama)
- uron i trim (poboljšavanje ravninskih klinova i veličine transoma)
- lokalno strujanje (predviđanje nominalnog sustrujanja, kavitacije, pozicioniranje ljuljne kobilice, usmjeravanje osovinskih koljena)
- oznake prijelaza, buke i tlaka (pomorska primjena)
- ostale primjene (proračuni za unaprjeđenje modelskih ispitivanja, istraživanje stabiliteta ravninskih trupova, i proučavanje poremećaja okoline)

Do sada daleko najčešća primjena je poboljšavanje pramčane forme upotrebom panel metoda. Ispitani su različiti tipovi pramca, sa ili bez bulba i poboljšanja su dobivena s obzirom na smanjeni otpor. Pored ovih poboljšanja nešto rjeđa su poboljšanja krmenog dijela trupa primjenom Navier-Stokesov-ih metoda.

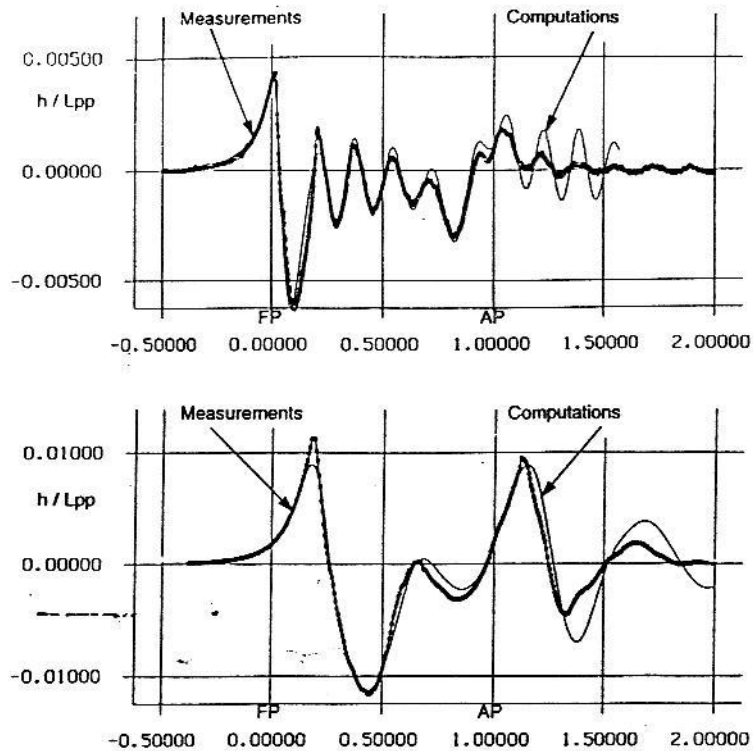
Za projektante su značajna točna predviđanja nominalnog sustrujanja. Nažalost, to je vrlo teško izvedivo. Nadalje, modelska ispitivanja su unaprijeđena primjenom CFD-a, kako brodskih formi tako i modela propelera.

3.2. Ograničenja i točnost CFD metoda

Iako su dosad najvažnije CFD metode u projektiranju brodova metode potencijalnog strujanja, značajan napredak je učinjen i na području panel metoda i viskoznih strujanja gdje do izražaja dolaze Navier-Stokesove jednačine.

Česta primjena CFD metoda u projektiranju brodova je proračun uzorka valovlja i poboljšavanje pramčane forme primjenom panel metoda. Dosadašnji rezultati pokazuju da se uzorak valovlja može predvidjeti s dovoljnom točnošću da se na osnovu toga može pristupiti modificiranju pramčane forme.

Slika 3.2. prikazuje odnos rezultata dobivenih eksperimentom i CFD-om.



Slika 3.2. Odsječci valova u blizini trupa; gore-brod sa $C_B=0,6$ i $F_n=0,316$;
dolje- brod sa $F_n=0,165$

Sa slike 3.2. se vidi da se puno bolji rezultati, u pogledu slaganja eksperimentalnih i proračunskih vrijednosti, postižu u pramčanom području (FP), nego u krmenom (AP).

Iako se uzorak valovlja može korisno upotrijebiti u optimizaciji trupa predviđanja otpora valova moraju se uzimati s oprezom, jer kod upotrebe panel metoda mala pojedinačna diskretizacijska greška može uzrokovati velika odstupanja u konačnom rezultatu.

Panel metode se primjenjuju za deplasmanske forme kod svih brzina, kod brodova s zrcalom iznad kritične brzine, te za višetrupne, SWATH i SES brodove i brodove s podvodnim krilima.

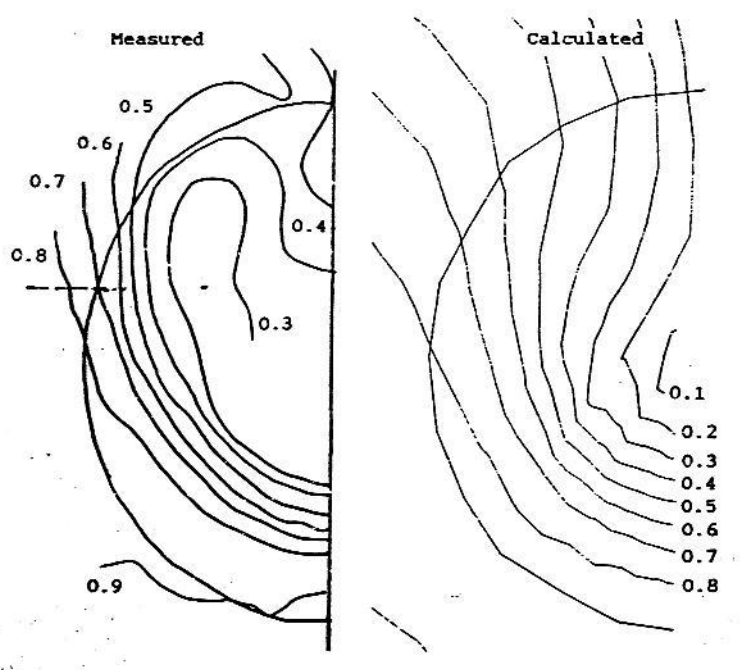
Efekte kod plovidbe u ograničenim vodama moraju se posebno razmatrati kao i efekti u radu propelera. Problemi se javljaju kad viskozni ili nelinearni efekti

postaju značajni. Jedini način rješavanja tih problema u budućnosti biti će primjena Navier-Stokes-ovih jednažbi.

Glavni problem kod Navier-Stokes-ovih jednažbi je nedovoljna rezolucija valova, naročito kod malih Froude-ovih brojeva, što uzrokuje nemogućnost dovoljno točnog predviđanja detalja sustrujanja. Današnji rezultati pokazuju da su metode potencijalnog strujanja superiornije po tom pitanju od Navier-Stokes-ovih metoda. Problem kod Navier-Stokes-ovih jednažbi je i nedovoljna točnost kod proračuna otpora u punom mjerilu (full-scale resistance prediction).

Međutim, u budućnosti se može očekivati sve veća primjena posebnih Navier-Stokes-ovih formula zvanih RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes).

Slika 3.2.1. prikazuje tipične rezultate proračuna sustrujanja upotrebom Navier-Stokes jednažbi.



Slika 3.2.1. Tipični rezultati proračuna sustrujanja pomoću CFD-a. Prikazane su krivulje brzine strujanja u disku propelera za jedan moderni tanker (1992.).

Lijevo: izmjereni rezultati; Desno: proračunski rezultati

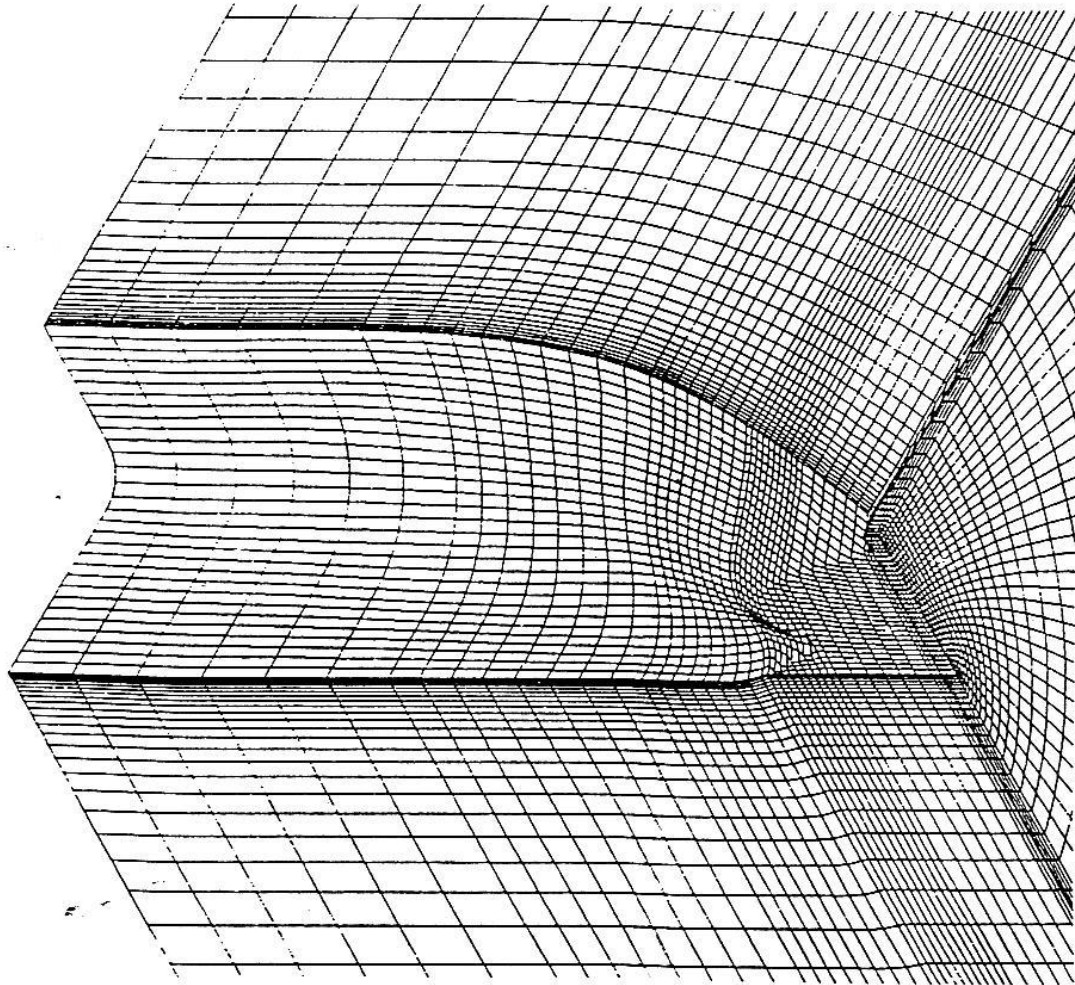
Linearne metode suočavaju se s problemom nepreciznog opisa strujanja u blizini slobodne površine. Grešci doprinose aproksimacija rubne lokacije (mirne površine) kao i rubni uvjeti (linearizirani). Za većinu brodova ove greške uzrokuju smanjenje proračunatog otpora.

CFD metode još uvijek nisu dovoljno točne za predviđanje detalja strujanja iza trupa (modeliranje turbulencije).

4. OPIS FORME ZA POTREBE CFD-a

Da bi se mogli izvesti proračuni CFD metodama pomoću kompjutera potrebno je formu broda opisati matematički. Trup broda je vrlo glatka površina i generiranje te površine na računalu se izvodi u CAD/CAM sustavima koji podržavaju razne oblike interpolacije točaka krivuljama i plohama. Najčešće su u upotrebi bile kubične spline funkcije, a u posljednjih desetak godina njihovo mjesto preuzimaju NURBS funkcije i postaju *de facto* standard u sustavima za modeliranje forme broda.

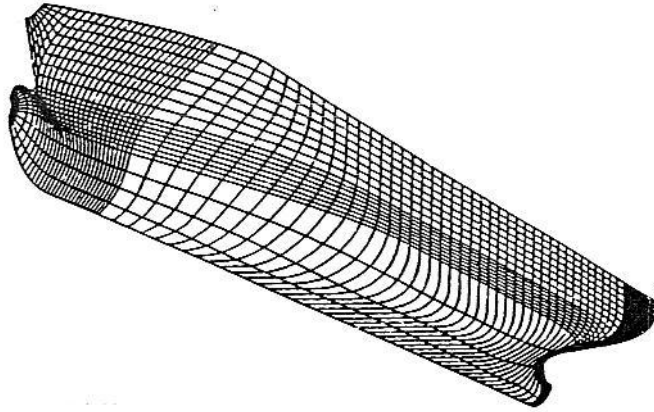
Proračunska domena izvan trupa i u sustrujanju može se transformirati u mrežu pravokutnih blokova bez poteškoća. Međutim, kada se uzmu u obzir i razni privjesci na trupu broda koji utječu na otpor, a CFD ih mora uzeti u obzir, javlja se potreba za kompleksnijim mrežama izvan trupa, pa čak i nestrukturnim mrežama. Takve mreže daju veću fleksibilnost u proračunima, ali imaju i niz mana pogotovo zbog sporosti proračunavanja i dobivanja rezultata, jer treba imati na umu da projektni uredi u brodogradilištima imaju vrlo malo vremena za CFD analize. Velike, guste mreže s velikim brojem točaka daju bolju točnost, ali i uzimaju puno vremena za dobivanje rezultata. Na slici 4. je prikazana mreža za jedan VLCC tanker.



Slika 4. Mreža za jedan VLCC tanker sa 140000 ćelija

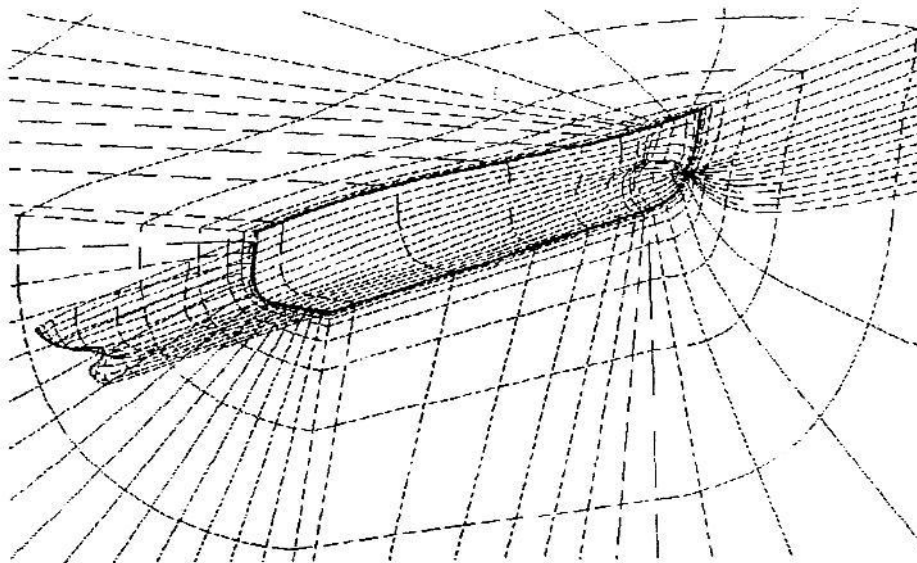
4.1. Generiranje panela za potrebe CFD-a

Za hidrodinamičke proračune kod primjene teorije potencijalnog strujanja potrebno je opisati trup broda posebnim panelima ili mrežom. Mreža panela kojom se opisuje površina trupa se izvodi upotrebom pojedinačnih ograničenja širine mreže za različite dijelove površine trupa. Paneli su najčešće definirani samo sa čvornim točkama i tretiraju se kao ravninski objekti. Slika 4.1. prikazuje jednu mrežu panela s područjima različite širine mreže.



Slika 4.1. Generiranje panela za potrebe CFD-a upotrebom područja s različitom širinom mreže

Metoda panela se tek odnedavno koristi za rješavanje problema u hidrodinamici broda. Ideja je preuzeta iz avio-industrije, a glavna zapreka njenoj primjeni u opisivanju strujanja oko broda je problem slobodne površine gdje nelinearni uvjeti trebaju biti ispunjeni na, a priori nepoznatoj lokaciji – na strmini valnog sistema kojeg stvara brod. Općenito, bolji rezultati se postižu s boljom i kompleksnijom mrežom, ali to potražuje puno proračunskog vremena. Istraživanja se stalno nastavljaju na ovom polju s ciljem postizanja što točnijih rezultata.



Slika 4.1.1. Složenost mreže oko trupa broda (HSVA tanker)

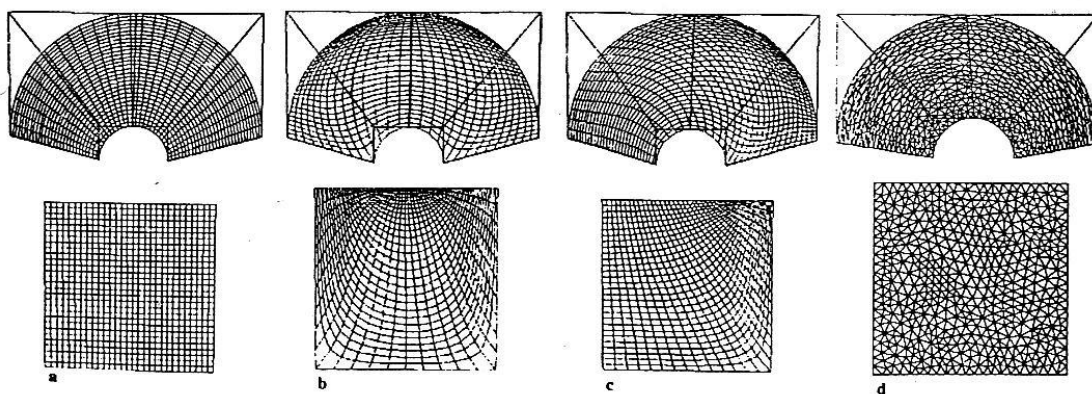
4.2. Modeliranje površine NURBS funkcijama

Generiranje diskretne reprezentacije domene rješenja je prvi korak u CFD simulacijskom procesu. Niz metoda s rastućim sposobnostima razvijen je u proteklom desetljeću. Između mnogih značajnih dostignuća su procedure uglačavanja površine bazirane na eliptičkim jednačbama i sheme algebarskih interpolacija za generiranje površine trupa i mreže fluida.

Generiranje numeričke mreže je najčešće radno najzahtjevniji dio CFD procesa. U praksi 80 – 90 % vremena u CFD procesu se troši na proračunavanje geometrije u odnosu na samo izračunavanje koda koji opisuje strujanje. Većina geometrijskih konfiguracija koja se primjenjuje u praksi projektirana je pomoću CAD/CAM sustava. Nažalost, veliki je broj izlaznih geometrijskih formata, koji tjeraju projektante da troše puno vremena na manipulaciju geometrijskih entiteta da bi postigli upotrebljiv geometrijski opis za potrebe generiranja mreže.

Danas je najraširenija je upotreba parametarskih neujednačenih racionalnih B-spline funkcija (NURBS) za geometrijski opis površine kao i za generiranje mreže za potrebe CFD-a.

U procesu generiranja mreže koriste se različite topologije za njen opis, prikazane na slici 4.2.



Slika 4.2. 3D NURBS plohe s izgledom mreže : a) O –tip mreže, b) H –tip mreže c) C –tip mreže, d) nestrukturna površina

Objekti izrađeni u CAD/CAM sustavima za modeliranje površine predstavljani kao npr. kubične spline površine, rotacione površine..., mogu se analitički transformirati u NURBS krivulje i površine koje se najčešće koriste u sustavima za generiranje mreže oko forme broda. Za ubrzavanje procesa i povećanje točnosti kod prenosa podataka, važno je i formu broda opisati NURBS krivuljama i plohama koje su analitički zadane na način:

NURBS krivulja reda k:

$$C(t) = \frac{\sum_{i=0}^n W_i d_i N_i^k(t)}{\sum_{i=0}^n W_i N_i^k(t)}$$

$N_i^k(t)$ je bazna funkcija reda k i definirana je nad vektorom čvora

$T = T_i, i=0, \dots, n+k$ sa sljedećim relacijama:

$$N_i^k(t) = \frac{(t - T_i) N_i^{k-1}(t)}{T_{i+k-1} - T_i} + \frac{(T_{i+k} - t) N_{i+1}^{k-1}(t)}{T_{i+k} - T_{i+1}}$$

$$N_i^k(t) = \begin{cases} 1 & T_i \leq t < T_{i+1} \\ 0 & \text{za ostale } t \end{cases}$$

W_i su pripadne težine svake kontrolne točke, a $d_i, i=0, \dots, n$, su točke kontrolnog poligona.

NURBS ploha je proširenje iz krivulje koja je 1D tenzor u 2D tenzor i formulirana je na način:

$$S(s, t) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n W_{i,j} d_{i,j} N_i^{k1}(s) N_j^{k2}(t)}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n W_{i,j} N_i^{k1}(s) N_j^{k2}(t)}$$

gdje su $d_{i,j}$ formiraju 3D kontrolnu mrežu, $W_{i,j}$ su težine pojedinih kontrolnih točaka, a N su bazne funkcije reda k_1 odnosno k_2 u i -tom i j -tom smjeru.

NURBS krivulje i plohe daju lokalnu kontrolu nad karakteristikama krivulje, odnosno plohe čime je projektantu omogućena jednostavna manipulacija geometrije. Time je i omogućena velika fleksibilnost u generiranju mreže za potrebe CFD-a.

5. ZAKLJUČAK

Stalan razvoj kompjutera uvjetovao je i sve veću primjenu proračunskih metoda nasuprot eksperimentalnim ispitivanjima. Niža cijena i brže dobivanje rezultata velike su prednosti CFD, ali uz to je i prisutan nedostatak još uvijek nedovoljne točnosti za pojedine primjene. Općenito uzevši, bolje mreže daju veću točnost, ali traže puno vremena za računanje. Kod npr. avio-industrije i automobilske industrije projektni period traje nekoliko godina, dok je većina brodogradilišta prisiljena stvarati nekoliko projekata godišnje. (Kolika je složenost CFD proračuna svjedoči i izgradnja kompjutera s 7264 integrirana Pentium Pro procesora od strane Intel korporacije), što znači da je vrijeme za hidrodinamičke proračune osjetno kraće u brodogradnji.

Veliku ulogu u upotrebi CFD-a u brodogradnji ima modeliranje forme trupa na način prihvatljiv za kompjuterske proračune. Danas se sve više kao standard u modeliranju trupa u brodogradnji nameću NURBS funkcije zbog niza odlika (mogućnost opisivanja različitih geometrijskih oblika, jednostavna kontrola geometrije i mogućnost brzog mijenjanja forme...). Cilj je takav način opisa forme integrirati, u softverskom smislu, s algoritmima za proračunavanje otpora broda, gdje bi projektanti mogli jednostavnom izmjenom geometrije vrlo brzo dobiti rezultate o otporu broda. Međutim, još uvijek na ovom polju u brodogradnji nema značajnih softverskih paketa koji bi bitno ubrzali projektiranje i omogućili usporedbu većeg broja rješenja u kratkom vremenu. Trenutno su projektanti u mogućnosti dobiti samo grube proračune otpora, ali napretkom kompjuterske tehnologije točnost rezultata će se u budućnosti sve više poboljšavati.