

# Analiza uzdužnog porinuća broda metodom konačnih elemenata

---

Urem, Jure

Master's thesis / Diplomski rad

2012

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:565331>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-25**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ANALIZA UZDUŽNOG PORINUĆA BRODA METODOM KONAČNIH ELEMENATA  
**DIPLOMSKI RAD**

Mentor:  
Doc. Dr. Sc. Smiljko Rudan

Jure Urem

Zagreb, 2012.

**IZJAVA:**

Izjavljujem da sam diplomski rad izra dio samostalno, na temelju znanja steč enih na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveuč ilišta u Zagrebu, služeći se navedenom literaturom te uz nadzor mentora dr. sc. Smiljka Rudana.

**Jure Urem**

Zahvala:

Zahvaljujem se mentoru Smiljku Rudanu na pomoći i strpljenju te vremenu potrošenom prilikom izrade rada.

Veliko hvala mojim roditeljima jer su mi pružili sve, ja sam stvarno sretno dijete

**SADRŽAJ**

1 UVOD.....	8
1.1 OPĆENITO.....	8
1.2 STATIČKI PRORAČUN.....	9
1.3 DINAMIČKI PRORAČUN.....	9
1.4 METODE PRORAČUNA.....	10
1.5 OTPOR BRODA.....	12
1.5.1 PROBLEMI OTPORA BRODA.....	14
2 ANALITIČKI PRORAČUN.....	18
2.1 RAZMATRANI BROD.....	18
2.2 PRORAČUN PORINUĆA BRODA U BRODOGRADILIŠTU.....	19
2.3 GEOMETRIJSKA ANALIZA.....	23
2.4 DIFERENCIJALNA JEDNADŽBA - URŠIĆ.....	26
2.4.1 PRVA FAZA PORINUĆA.....	26
2.4.2 DRUGA FAZA PORINUĆA.....	30
2.4.3 TREĆA FAZA PORINUĆA.....	41
2.4.4 ČETVRTA FAZA PORINUĆA.....	43
2.5 DRUGA METODA.....	47
2.5.1 PRVA FAZA.....	48
2.5.2 DRUGA FAZA.....	50
2.5.3 TREĆA FAZA.....	51
2.5.4 ČETVRTA FAZA.....	53
2.6 TREĆA METODA - Vladimir Semyonov-Tyan-Shansky.....	58
2.6.1 PRVA FAZA.....	58
2.6.2 DRUGA FAZA.....	61
2.6.3 TREĆA FAZA.....	64
2.6.4 ČETVRTA FAZA.....	67
2.7 USPOREDBA REZULTATA.....	70
3 PRORAČUN U RAČUNALNOM PROGRAMU LS-DYNA.....	71

3.1 PRIPREMA MODELA ZA PRORAČUN U RAČUNALNOM PROGRAMU LS-DYNA.....	71
3.2 LS-DYNA.....	82
3.3 LS_DYNA NAREDBE.....	83
3.4 PRIKAZ ELEMENTA MODELA .....	88
3.5 REZULTATI IZ LS-DYNA-E.....	94
3 ZAKLJUČAK.....	102

## POPIS SLIKA

Slika 1– određivanje prevaljenih puteva kod kružne vlake; [1]STABILITET BRODA 1 J. Uršić .....	9
Slika 2 – Sučelje u VideoTracker.....	11
Slika 3 – faze porinuća .....	12
Slika 4 - Grande Costa d'Avorio .....	18
Slika 5 - Grande Costa d'Avorio tijekom porinuća (druga faza).....	19
Slika 6 - dijagram vremena po putu- Uljanik.....	20
Slika 7 – dijagram brzina po putu – Uljanik .....	20
Slika 8 – dijagram ubrzanja po putu – Uljanik.....	21
Slika 9 – prikaz modelirane forme broda u rhinocerusu .....	23
Slika 10 - prikaz broda na navozu u računalnom programu Rhinoceros .....	24
Slika 11 – prikaz ulaznih podataka iz Rhinoceros-a za prvu fazu porinuća.....	26
Slika 12– sile koje djeluju na brod tijekom prve faze porinuća; [1]STABILITET BRODA 1 – J.Uršić.....	26
Slika 13 – prikaz ulaznih podataka iz Rhina za drugu fazu porinuća .....	30
Slika 14 – Sile koje djeluju na brod tijekom druge i treće faze porinuća; [1] STABILITET BRODA 1 – J. Uršić.....	31
Slika 15 – karakteristični graf porinuća; [1]STABILITET BRODA 1 – J.Uršić.....	33
Slika 16 – prikaz krakova momenata koje je potrebno očitati iz računalnog programa Rhinocerus.....	35
Slika 17 – prikaz projiciranih površina broda i saonica .....	37
Slika 18 – prikaz ulaznih podataka iz Rhinocerosa za treću fazu porinuća .....	41
Slika 19 – Određivanje dopuštene veličine skraćivanja dovodnog dijela vlake; [1]STABILITET BRODA 1 – J.Uršić.....	42
Slika 20 – dijagram brzina po putu broda – diferencijalna jednadžba - Uršić .....	45
Slika 21 – dijagram ubrzanja po putu broda – diferencijalna jednadžba – Uršić.....	46
Slika 22 – brzina gibanja broda po putu – jednadžba bilance energije - Uršić .....	55
Slika 23 – prikaz svih sila koje djeluju na brod u trećoj fazi porinuća – [2]Statics and Dynamics of the ship - Vladimir Semyonov-Tyan-Shansky .....	64
Slika 24 – dijagram brzine po putu .....	69
Slika 25 – usporedba rezultata .....	70
Slika 26 – prikaz broda u hydromax-u .....	73

Slika 27 – dijagram rasporeda masa.....	75
Slika 28 - Uzgon lakog broda za pravi trim .....	80
slika 29 - Uzgon brod – za različite gazove .....	80
Slika 30 - Areala rebara za projektni gaz od 9.4 m .....	81
Slika 31 – prikaz modeliranih opruga uzgona u ls-dyna-i .....	81
Slika 32 – sile u oprugama .....	86
Slika 33 – cjelokupni model u Ls-Dyna-i .....	88
Slika 34 – elementi trupa; PID 24 .....	89
Slika 35 – elementi dna; PID 25.....	89
Slika 36 - elementi potpornja zipke; PID 50 .....	90
Slika 37 – prikaz elemenata saonika PID 75 .....	90
Slika 38 – prkaz zakrivljenosti saonika.....	91
Slika 39 – prikaz grednih elemenata dna; PID 100.....	91
Slika 40 – prikaz elemenata saonica; PID 101 .....	92
Slika 41 – gornji i donji elemeti zipke PID 201 i 202.....	92
Slika 42 – proćunate brzine po putu, LS-DYNA .....	94
Slika 43 – kinetićka energija po putu .....	95
Slika 44 – Suma sila u oprugama LS-DYNA .....	96
Slika 45 – uzgon broda po putu.....	96
Slika 46 – ponašanje zipke tijekom prve i druge faze porinuća .....	97
Slika 47– ponašanje zipke tijekom treće faze porinuća .....	97
Slika 48 – ponašanje zipke tijekom četvrte faze porinuća .....	98
Slika 49 – X=0; grefićka usporedba mjerenja, geometrijske nalize i LS-dyna-e.....	99
Slika 50 – X=150; grefićka usporedba mjerenja, geometrijske nalize i LS-dyna-e.....	100
Slika 51 – X=200; grefićka usporedba mjerenja, geometrijske nalize i LS-dyna-e.....	101



**POPIS TABLICA**

Tablica 1 –pregled izraza za otpor broda tijekom porinuća .....	17
Tablica 2 – podaci dobiveni proračunom u brodogradilištu uljanik .....	22
Tablica 3 – primjer Rhinoceros izvještaja za konkretni kut pomaka na $5.85^\circ$ .....	24
Tablica 4 – proračun prve faze porinuća – diferencijalna jednačba - Uršić.....	28
Tablica 5 – proračun ravnoteže momenata u drugoj i trećoj fazi porinuća broda.....	34
Tablica 6 - proračun bensovog koeficijenta .....	36
Tablica 7 – prvi dio proračuna druge faze porinuća – diferencijalna jednačba - Uršić .....	38
Tablica 8 – drugi dio proračuna druge faze porinuća – diferencijalna jednačba - Uršić .....	38
Tablica 9 – drugi dio proračuna druge faze porinuća – diferencijalna jednačba - Uršić .....	39
Tablica 9 –proračun četvrte faze porinuća – diferencijalna jednačba - Uršić .....	44
Tablica 10 – proračun prve faze porinuća – jednačba bilance energija - Uršić .....	49
Tablica 11 – proračun druge i treće faze porinuća – jednačba bilance energija - Uršić .....	51
Tablica 12– proračun četvrte faze porinuća – jednačba bilance energija - Uršić.....	54
Tablica 13 – proračun prve faze porinuća – dieferencijalna jednačba - Shansky .....	59
Tablica 14 – proračun druge faze porinuća – dieferencijalna jednačba - Shansky .....	62
Tablica 15 – proračun treće faze porinuća – dieferencijalna jednačba - Shansky .....	65
Tablica 16 – proračun treće faze porinuća – dieferencijalna jednačba - Shansky .....	68
Tablica 17 – izlistak iz maxsurfa.....	76
Tablica 18 – popis cijelina.....	93

**POPIS OZNAKA**

$v_1$  - brzina na računatog intervala

$v_2$  - brzina na kraju računatog intervala

$\vartheta$  - kut nagiba vlake

$g$  - gravitacijska konstanta

$b$  - ubrzanje broda

$v$  - brzina broda

$x$  - prijeđeni put broda po odedenim koracima

$t$  - vrijeme potrebno da brod prijeđe zadani put

$D$  - težina broda

$U_1$  - Istisnina saonica

$U_2$  - Istisnina broda

$U$  - ukupna istisnina

$X_{U1}$  - udaljenost težišta istisnine saonica od proizvoljnog koordinatnog sustava

$X_{U2}$  - udaljenost težišta istisnine broda od proizvoljnog koordinatnog sustava

$X_T$  - udaljenost težišta broda od proizvoljnog koordinatnog sustava

$X_O$  - udaljenost Točke okretanja broda od proizvoljnog koordinatnog sustava

$A_{11}$  - uronjena projekcirana površina saonica u smjeru gibanja broda

$A_{12}$  - uronjena projekcirana površina saonica u smjeru gibanja broda

$A_{21}$  - uronjena projekcirana površina broda u smjeru gibanja broda

$A_{12}$  - uronjena površina saonica

$A_1$  - uronjena površina broda

$A_2$  - uronjena površina broda

$D$  - težina broda [t]

$g$  - gravitacijska konstanta

$x'$  - veličina koraka

$k$  – koeficijent otpora broda

$\mu_G$  - faktor trenja između morskog dna i utega

$G$  - težina utega

$N$  - razlika težine i istisnine u određenom koraku

$n_l$  – Dio raspisani integral diferencijalne jednačbe

$b$  – razmak

$F$  – sila u opruzi

$\rho$  – gustoća vode

# 1 UVOD

## 1.1 OPĆENITO

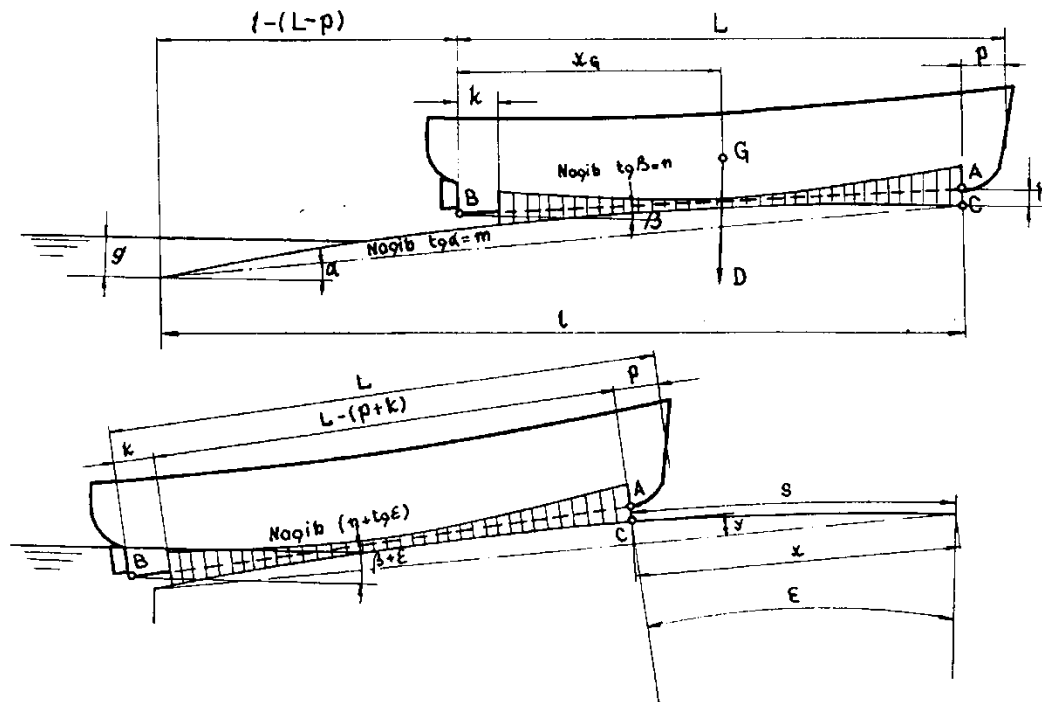
Brod koji je građen na navozu ili vlaci brodogradilišta i koji ima masu od nekoliko tisuća tona treba porinuti u vodu, nakon što su radovi toliko napredovali da je trup broda nepropusan. Ta operacija koja se općenito naziva porinuće broda je riskantna, jer se javljaju sile odnosno momenti koji opterećuju brodsku konstrukciju i naprave pomoću koje ih se brod spušta u vodu, a koji se nazivaju saonik i saonice. Kada se brod jednom pokrenuo iz svog položaja ravnoteže više nemamo utjecaja na njegovo gibanje toliko dugo dok ne bude posve u vodi. Zbog toga je potrebno unaprijed poznavati sve sile i momente, kao i brzine i ubrzanja, kojima će biti izložena brodska konstrukcija, a potom proračunati i pritiske koju djeluju na drvenu konstrukciju saonika i saonica. Iz tih razloga je potrebno izvoditi proračun porinuća za svaki novi brod koji se gradi.

Kod pomorskih brodogradilišta uobičajeno je uzdužno porinuće jer ona nemaju veliku duljinu slobodne obale pa sam smještaj brodogradilišta uvjetuje način porinuća. Osim toga razmjerno visoki i uski pomorski brodovi pogodniji su za uzdužno porinuće. Nasuprot tome kod riječnih brodova uobičajeno je poprečno porinuće broda. Riječna brodogradilišta razvijaju se, za razliku od pomorskih, više duž obala rijeke, nego u unutrašnjost, i razmjerno plitki i široki riječni brodovi ne bi izdržali velike momente savijanja koji se javljaju kod uzdužnog porinuća. Također i duljina slobodnog otplova, koja stoji na raspolaganju brodu kad napusti navoz je vrlo ograničena kod riječnih brodogradilišta, jer je susjedna obala obično blizu. Brod se mnogo brže zaustavlja ako je porinut u vodu bočno, nego u uzdužnom smjeru.

Kod uzdužnog porinuća brod se porine krmom u more, a ne pramcem. Za to postoji više razloga. Jedan od najvažnijih jest to što su na krmi broda ugrađeni osovinski vodovi i kormilarski uređaj koji se moraju točno centrirati pa bi svaka veća deformacija nastala prilikom porinuća onemogućila rad tih uređaja. Maksimalna reakcija prilikom porinuća nastaje na onom dijelu broda koji najkasnije ulazi u vodu, dakle kod uzdužnog porinuća krmom na pramcu. Forme pramca su uske i konstrukcija je dovoljno čvrsto izvedena (koliziona pregrada), a može se po potrebi i privremeno pojačati, tako da se maksimalna reakcija koja nastaje prilikom okretanja broda oko čela saonica može lako preuzeti. Nastale deformacije nisu toliko štetne jer na pramcu ne postoje uređaji koji bi na njih bili toliko osjetljivi kao što je to slučaj na krmi.

## 1.2 STATIČKI PRORAČUN

Puni statički proračun, osim jednog djela, u sklopu ovog rada nije bilo potrebno napraviti. Statički proračun daje podatke o uzgonu, momentima uzgona za kraj vlake, momentima težina za kraj vlake, momentima težina uzgona za čelo saona i raspored pritiska saonice. Sve te varijable se računaju kao funkcije pomaka broda po navozu. D



Slika 1 – određivanje prevaljenih puteva kod kružne vlake; [1]STABILITET BRODA I J. Uršić

## 1.3 DINAMIČKI PRORAČUN

Međutim, u stvarnosti sile koje djeluju na brod nisu uravnotežene, stoga u svakom trenutku preostaje jedna rezultanta koja proizvodi ubrzano, odnosno usporeno gibanje broda. Zbog nejednolike brzine gibanja broda, nastaju još i dodatne sile inercije koje kod statičkog proračuna nisu uzete u obzir.

Svrha dinamičkog proračuna uzdužnog porinuća nije određivanje sila inercije kako bi korigirali statički proračun, jer su one u odnosu na sile težine i uzgona malene pa se u normalnim okolnostima mogu zanemariti. Svrha dinamičkog proračuna porinuća je određivanje brzina. Nužno je poznavati maksimalnu brzinu broda koja nastupa kod porinuća i koja ne smije prijeći stanovitu vrijednost (7 do 8 m/sek), jer onda nastaju sile inercije koje

nisu više zanemarivo malene, pa statički proračun porinuća više ne daje vjerodostojne vrijednosti. Uz to, ako brod postigne prilikom porinuća preveliku brzinu, njegova kinetička energija postaje velika i bit će ga teško zaustaviti na duljini slobodnog otplova koja mu obično stoji na raspolaganju. Brzinu u času otplova potrebno je znati i kako bi se mogla odrediti linija padanja pramca kod prekratke vlake, tako da brod ne udari pramcem u vlak, i naposljetku kako bi se izračunao put nakon kojeg će se brod u toku slobodnog otplova zaustaviti. To je iznimno važno u slučaju ograničene površine slobodne vode ispred vlake kada je potrebno upotrijebiti posebna sredstva za zaustavljanje broda prilikom otplova (štitovi na krmi, sidra i lanci).

## 1.4 METODE PRORAČUNA

U sklopu diplomskog zadatka bilo je potrebno izraditi tri analitička proračuna i jedan numerički u računalnom programu LS-Dyna. Uz to bila su nam dostupna GPS mjerenja porinuća broda i video snimka koju smo analizirali u računalnom programu za video analizu VideoTracker, iz kojih smo dobili pomake, brzine i ubrzanja u funkciji vremena.

GPS mjerenja su se radila tako da su se postavili uređaji visoke preciznosti sa frekvencijom 1Hz. Ispis nam daje položaj uređaja sa XY koordinatama, gdje se X mjeri od Greenwicha u metrima, a Y od ekvadora isto u metrima. Od tih podataka oduzme mu se početna pozicija da bi dobili ishodište koordinatnog sustava. Vezano za ove koordinate dobiva se i brzina u datoj točki i vrijeme koje je prošlo od početka mjerenja.

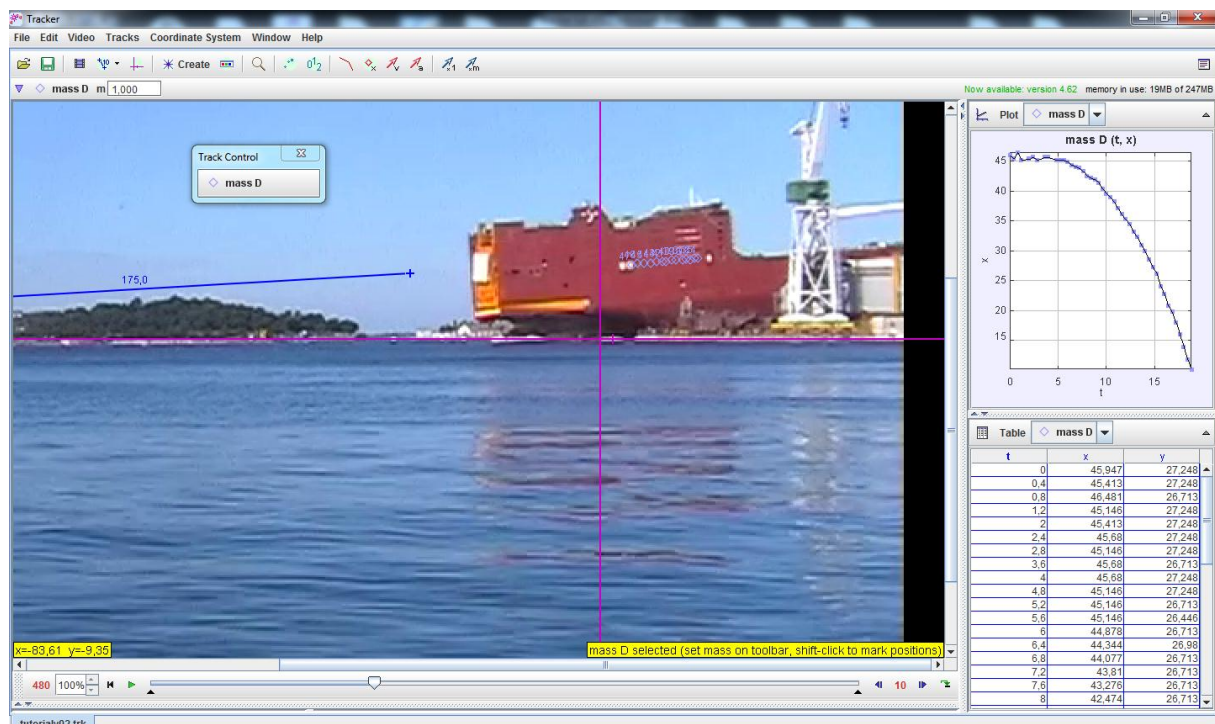
VideoTracker je računalni program namjenjen praćenju gibajućih objekata iz video zapisa. U ovom slučaju je to bio brod tijekom porinuća. VideoTracker ima mogućnost ručnog automatskog praćenja. Trebalo je izabrati točku na brodu koju videoTracker može pratiti u svakom trenutku. To je bilo malo teže zato jer video snimak porinuća nije bio najviše kvalitete. VideoTracker je dao podatke o putu, vremenu, brzini, ubrzanjima.

Analitička metoda rješavanja porinuća broda putem diferencijalnom jednačinom se računa rješavanjem diferencijalne jednačine gdje je varijabla put koji je brod prošao, rješavanje se mogu dobijaju izrazi za ubrzanja, brzine i vrijeme po putu

Osim diferencijalne jednačine porinuća broda se može riješiti i rješavanjem jednačine bilance energije tako da brod na početku porinuća ima maksimalnu potencijalnu energiju, koja

se spuštanjem broda u vodu pretvara i kinetičku energiju, odnosno troši se na svladavanje radnje otpora trenja i otpora vode.

Numerička metoda se u ovom slučaju rješavala uz pomoć računalnog programa LS-dyna. Originalnost programa leži u nelinearnoj dinamici analize konačnih elemenata, koristeći eksplicitnu vremensku integraciju. Prije proračuna trebalo je izvesti pregradnje, modeliranja broda, modeliranja opruga koje stoje za uzgon, definiranja krivulja otpora i definiranja kontaktnih površina.

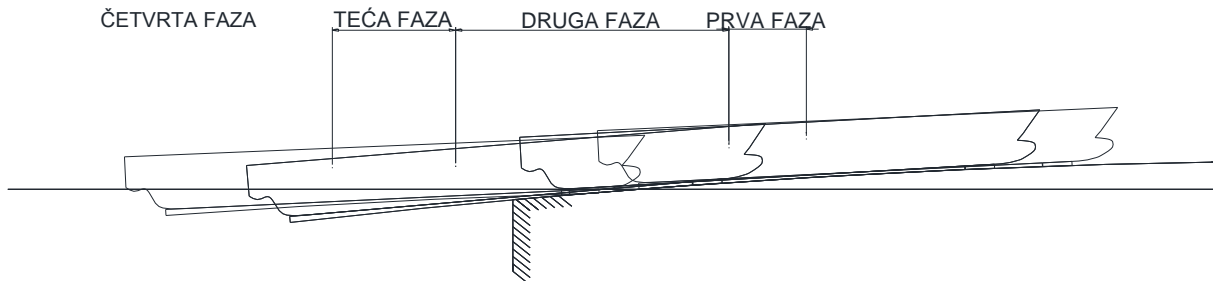


Slika 2 – Sučelje u VideoTracker

Analitičke metode su se računale u četiri faze

1. Prva faza porinuća – prva faza traje dok brod još nema ugona, to jest od početka gibanja brod pa do trenutka kad saonice ne dotaknu vodu
2. Druga faza porinuća – druga faza traje od trenutka kad brod takne vodu pa do trenutka kad se saonice i brod počnu odvajati od saonika zbog momenta uzgona koji je prerastao moment težine broda koji djeluje oko koljevke.
3. Treća faza porinuća – traje do trenutka kada čelo saona napušta vlak.
4. Četvrta faza porinuća – otplov – traje od trenutka kad je brod napusti vlak pa do trenutka kada se nezaustavi.

Proračun svake faze treba voditi zasebno zbog posebnosti uvjeta, sila i momenata koji u pojedinom trenutku djeluju na brod.



Slika 3 – faze porinuća

## 1.5 OTPOR BRODA

### HOLTROPOVA METODA

Procjena otpora broda primjenom metoda statističke analize pobuđuje zanimanje cijeli niz godina. Procjenu otpora na osnovi statističke analize većeg broja podataka obradio je holtrop u nizu članaka. U ovim je člancima prikazan razvoj metode za procjenu otpora broda koja se temelji na regresijskoj analizi odabranih podataka dobivenih mjerenjima na modelima i brodovima. Bazu podataka čini 334 modela brodova za prijevoz tekućeg tereta, rasutog tereta, teretnih brodova za prijevoz kontejnera te ratnih plovila. Rezultati su analizirani na temelju jednadžbe za otpor broda:

$$R_T = R_F(1 + k_1) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A \quad (1.1)$$

U ovoj jednadžbi otpor trenja  $R_F$  računa se prema izrazu ITTC-1957, a faktor forme  $(1+k_1)$  temelji se na regresijskoj jednadžbi i prikazan je kao:

$$(1 + k_1) = 0.93 + 0.487118 \quad (1.2)$$



$$(1 + 0.011C_{stern}) \cdot (B / L_{WL})^{1.06806} (T / L_{WL})^{0.46106} (L_W / L_R)^{0.121563} (L_{WL}^3 / \nabla)^{0.36486} (1 - C_P)^{-0.604247}$$

Ukoliko vrijednost dužine krmenog zaoštrenja  $L_R$  nije poznata, može se izračunati na sljedeći način:

$$L_R = L_{WL} [1 - C_P + 0.006 \cdot C_P \cdot LCB / (4C_P - 1)] \quad (1.3)$$

Za ostale komponente ukupnog otpora Holtrop daje vrlo složene izraze koji ovdje nisu navedeni. Holtrop-ova metoda je pouzdana i omogućava primjerenu procjenu otpora za širok raspon brodskih formi.

### HOLLENBACHOVA METODA

Hollenbach je analizirao mjerenja otpora za 433 modela brodava obavljenih u Institutu za ispitivanje modela u Beču između 1980. i 1995. Godine radi poboljšanja teretnih brodova u preliminarnoj fazi osnivanja. Hollenbach daje izraze koji vrijede za krivulju koja najbolje odgovara vrijednostima otpora tj. najmanjih otpora koje bi projektant mogao ostvariti nakon opširne optimizacije brodskih linija, ukoliko projekt nije podređen ograničenjima. Pored  $L_{PP}$  i  $L_{WL}$  koji su definirani na uobičajeni način Hollenbach uvodi i oplakanu dužinu  $L_{OS}$  koja se za projektni gaz definira kao udaljenost između točke projektne vodne linije. Kod Raščlambe otpora nije uzet u obzir faktor forme. Preostali otpor izražava se kao

$$R_R = 1/2 \cdot C_R \cdot \rho \cdot V^2 (B \cdot T / 10) \quad (1.4)$$

Kao referentna površina umjesto  $S$  koristi se izraz  $(BT/10)$ . Bezdimenzijski koeficijent  $C_R$  općenito se izražava za „srednje“ i „minimalne“ vrijednosti kao:

$$C_R = C_{R,Standard} \cdot C_{R,Fnkrit} \cdot k_L \cdot (T/B)^{a_1} \cdot (B/L_{PP})^{a_2} \cdot (L_{OS}/L_{WL})^{a_2} \cdot (L_{OS}/L_{WL})^{a_3} \cdot (L_{OS}/L_{PP})^{a_4} \cdot [1 + (T_A - T_F)/L_{PP}]^{a_5} \cdot (D_P/T_A)^{a_6} \cdot (1 + N_{Rudd})^{a_7} \cdot (1 + N_{Brac})^{a_8} \cdot (1 + N_{Boss})^{a_9} \cdot (1 + N_{Thruster})^{a_{10}} \cdot \quad (1.5)$$

$$C_{R,Standard} = b_{11} + b_{12}Fn + b_{13}Fn^2 + C_B(b_{21} + b_{22}Fn + b_{23}Fn^2) + C_B^2(b_{31} + b_{32}Fn + b_{33}Fn) \quad (1.6)$$

$$C_{R,Fnkrit} = \max[1, 0; (Fn / Fn_{krit})^{C_1}] \quad (1.7)$$

$$Fn = d_1 + d_2 C_B + d_3 C_B^2 \quad (1.8)$$

$$k_L = e_1 L_{PP}^2 \quad (1.9)$$

Izrazi vrijede za sljedeća područja Froude-ovih brojeva:

$$Fn_{\min} = \min[f_1, f_1 + f_2 \cdot (f_3 - C_B)]$$

$$Fn_{\min} = g_1 + g_2 C_B + g_3 C_B^2 \quad (1.8)$$

„Maksimalni“ ukupni otpor odeđuje se kao:

$$R_{T,\max} = h_1 \cdot R_{T,\text{mean}} \quad (1.9)$$

Hollenbachova metoda je najsuvremenija, jednostavno se može programirati i u najmanju ruku je jednako dobra kao ostale tradicionalne metode koje se primjenjive na moderne brodske forme.

### 1.5.1 PROBLEMI OTPORA BRODA

Otpor broda prilikom porinuća broda nije jednostavno odrediti, a neke iskustvene formule za koeficijent otpora su se pokazale potpuno pogrešnima i nedovoljnima za opis stvarnih fizikalnih pojava u stvarnosti. Krenimo redom

- Diferencijana jednadžba – prof. Uršić

Uršić otpor piše kao umožak koeficijenta otpora i kvadrata brzine

$$W = k \cdot v^2 [t] \quad (1.10)$$

Gdje za  $k$  dano nekoliko izraza, a prvi od njih je Bensonov koeficijent

$$k = 52,56 \cdot (0,63A_1 + 0,004A_2) [t/m^2] \quad (1.11)$$

Gdje su:

$A_1$  - uronjena projekcirana površina broda i saonica u smjeru gibanja broda [ $m^2$ ]

$A_2$  - uronjena površina broda i saonica [ $m^2$ ]

Nažalost ova metoda je pokazala najviše manjkavosti davajući prevelike iznose koji su se pokazali potpuno nekorisnim i pogrešnim. S obzirom da neznamo jeli možda ovaj izraz u ovakovom obliku tiskarska greška u knjigi prof. Uršića, trebalo je naći originalni članak i provjeriti izraz, međutim nismo ga uspjeli naći niti u internetskim bazama znanstvenih članaka, niti u fakultetskim knjižnicama

Drugi ponuđeni izraz za koeficijent otpora pri porinuću broda je dan izrazom:

$$k = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \xi \cdot F \text{ [t/m}^2\text{]} \quad (1.12)$$

Gdje su:

$\rho$  - gustoća [ $t/m^3$ ]

$\xi$  . – koeficijent koji se kreće od 1.2 do 1.5

$F$  – uronjena površina štita [ $m^2$ ]

Pošto naš brod nema štitove, ova kao i formula za Bensonov koeficijent nam je beskorisna. Ako pretpostavim da nam je profil glavnog rebra predstavlja štit opet dobivamo prevelike iznose.

Treća formula koja je ponuđena u fazi otplova broda glasi

$$k = \zeta \cdot \Delta^{2/3} \text{ [t/m}^2\text{]} \quad (1.13)$$

Gdje su:

$\Delta$  - masa broda [ $t$ ]

$\zeta$  . - koeficijent za koji je preporučena vrijednost 0.005

Ova formula odgovara stvarnosti, međutim nije navedeno dali se može koristiti za drugu i treću fazu porinuća broda, ali u usporedbi sa iskustvenom formulom brodogradilišta Uljanik, koju ćemo kasnije obraditi u tekstu, zaključujemo da ju je moguće koristiti u svim fazama porinuća broda.

- Jednadžba bilance energije – prof. Uršić

U daljnjem tekstu gdje prof. Uršić obrađuje drugu metodu proračuna porinuća broda zbog svoje prirode jednadžbe bilance energije daje sljedeću malo izmjenjenu formulu za otpor broda.

Uršić otpor piše kao umožak koeficijenta otpora i kvadrata brzine

$$W = k \cdot \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} [t] \quad (1.14)$$

Gdje su

$v_1$  - brzina na računatog intervala [m/s]

$v_2$  - brzina na kraju računatog intervala [m/s]

Prof. Uršić u ovom poglavlju ne spominje dodatne formule za računanje koeficijenta za otpor broda pri porinuću, pa pretpostavljamo da sve formule koje su navedene za koeficijent otpora za metodu rješavanja diferencijalnom jednadžbom.

- Diferencijalna jedandžba - prof. Semyonov-Tyan-Shansky

Otpor broda u konačnoj formuli je dan kao sljedeći izraz:

$$R = k_s \frac{D_l}{g} s'' + \frac{\rho}{2} C_s W^{2/3} s'^2 [t] \quad (1.15)$$

$k_s$  - koeficijent dodane mase  $\approx 0.05$

$D_l$  - istisnina [t]

$g$  – gravitacijska konstanta [m/s<sup>2</sup>]

$s''$  – ubrzanje [m/s<sup>2</sup>]

$\rho$  - gustoća [t/m<sup>3</sup>]

$C_s$  - nedimenzijski koeficijent, „koeficijent otpora“, preporučena vrijednost za drugu i treću fazu porinuća iznosi  $\approx 0.35$ , a za četvrtu  $\approx 0.12$

$W$  - istisnina broda [t]

$s'$  – ubrzanje [m/s]

Već na prvi pogled vidi se da je prof. Semyonov-Tyan-Shansky dao potpuniji izraz za otpor broda pri porinuću, što u konačnici daje puno bolje rezultate nego prethodne dvije metode.

- Brodogradilište Uljanik

Brodogradilište Uljanik računa otpor broda pri porinuću sa sljedećom iskustvenom formulom

$$W = k \cdot D \cdot v^2 \quad (1.16)$$

Gdje su:

$k$  - iskustveni koeficijent, za konkretni brod =0.0002

$v$  - brzina broda [m/s]

$D$  – istisnina broda [t]

Ova metoda daje iznimno dobre rezultate, a zbog svog jednostavnog zapisa je pogodna za proračune.

metoda proračuna	otpor	koeficijent otpora	primjer
diferencijalna jednadžba - Uršić	$W = k \cdot v^2$	$k = 52,56 \cdot (0,63A_1 + 0,004A_2)$ $k = \zeta \cdot \Delta^{2/3}$ $k = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \xi \cdot F$	10850 3 120
jednadžba bilance energije - Uršić	$W = k \cdot \frac{v_2^2 - v_1^2}{2}$	/	/
diferencijalna jednadžba - Shansky	$R = k_s \frac{D_l}{g} s'' + \frac{\rho}{2} C_s W^{2/3} s'^2$	$C_s=0.35$ $C_s=0.12$	$\approx 107$
brodogradilište uljanik	$W = k \cdot D \cdot v^2$	$k=0.0002$	2.94

Tablica 1 –pregled izraza za otpor broda tijekom porinuća

Stupac u koji je označen kao primjer daje veličinu za koeficijent otpora za četvrtu fazu

## 2 ANALITIČKI PRORAČUN

### 2.1 RAZMATRANI BROD



*Slika 4 - Grande Costa d'Avorio*

Razmatrani brod je „Grande Costa d'Avorio“ odnosno gradnja 483 koji je sagrađen u brodogradilištu Uljanik za talijansku kompaniju Grimaldi. Riječ je o sedmom i zadnjem brodu iz serije višenamjenskih brodova za prijevoz automobila, kamiona i kontejnera nosivosti 24.800 tona koje je Uljanik Brodogradilište izgradilo za ovog renomiranog talijanskog broдача.

„Grande Costa d'Avorio“ poput ostalih brodova iz serije istodobno na dvanaest paluba, od čega su dvije prilagodljive, može prevoziti oko 3.890 automobila i 1.360 kontejnera, a posadu čini 30 ljudi. Ukupna dužina broda iznosi 210, širina 32, a visina 21,5 metara. Do krajnje brzine od 21,9 čvorova porivat će ga Uljanik/MAN glavni motor snage 19.040 kW.

„Grande Costa d'Avorio“ će kao i ostali brodovi iz serije namjenjen transportu roba i dobara između sjevera Europe i zapadne Afrike.

Linije trupa su dane u prilogu 1

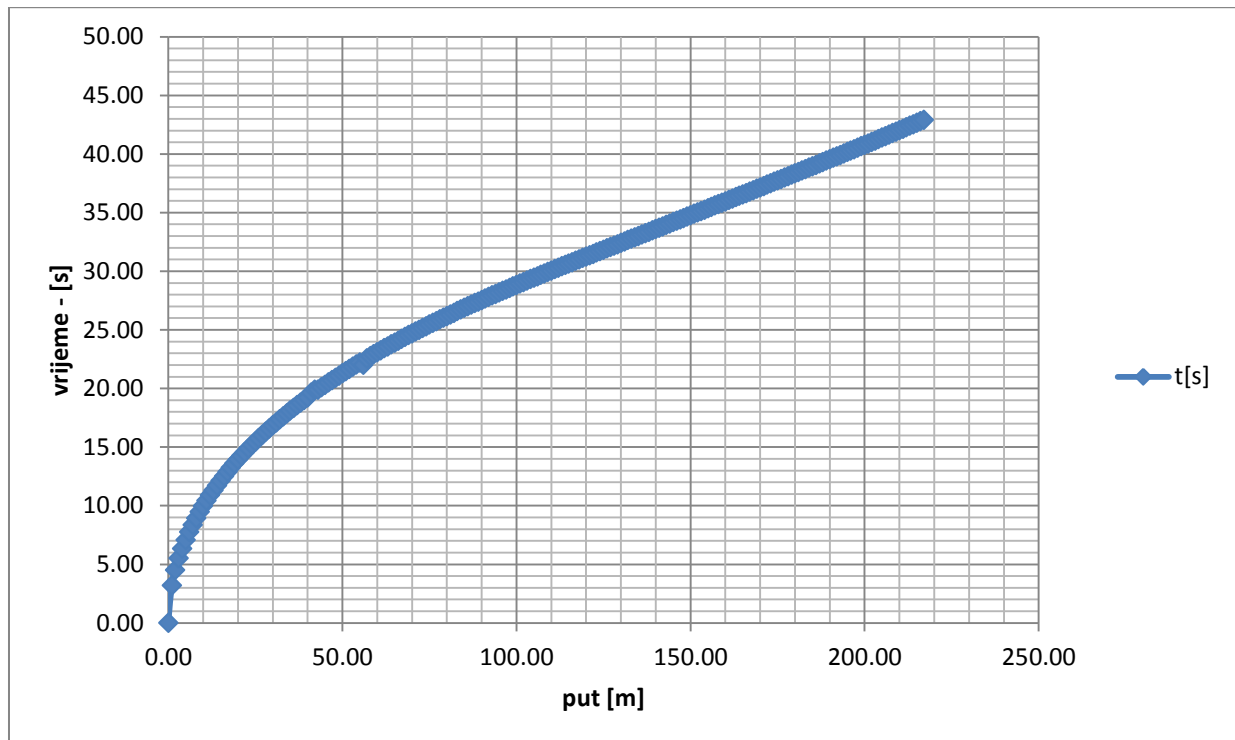


*Slika 5 - Grande Costa d'Avorio tijekom porinuća (druga faza)*

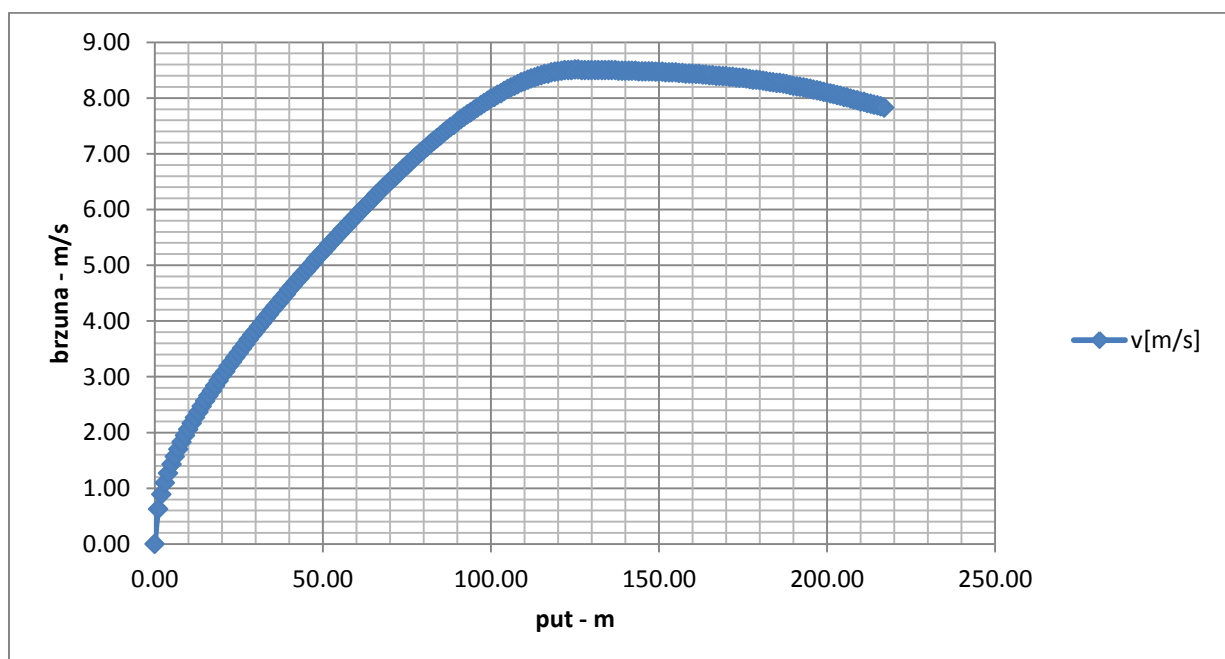
## **2.2 PRORAČUN PORINUĆA BRODA U BRODOGRADILIŠTU**

Proračun porinuća broda u brodogradilištu Uljanik se obavlja u računalnim programom koji su samo razvili. Računalni program nakon unosa podataka daje detaljni izvještaj o porinuću broda. Izvještaj sadrži standardne podatke o porinuću poput momenata, sila, pritisaka, akceleracija, brzina i puta u funkciji puta i vremena. Daje i neke podatke o metacentru koji se ne razmatraju u ovom diplomskom radu, pa čak se ne razmatraju često ni u stručnoj literaturi. Taj nam podatak može koristiti kad je riječ stabilitetu broda tijekom porinuća.

Cjeli proračun iz brodogradilišta Uljanik dan je u prilogu 2

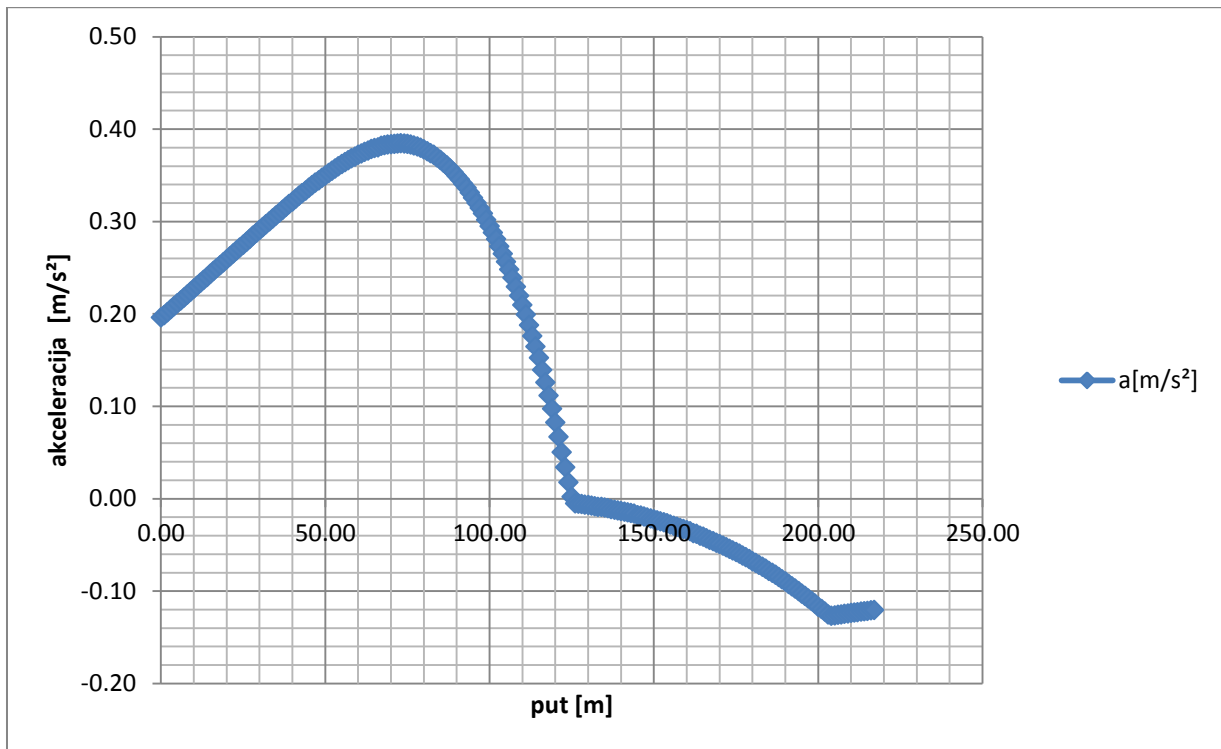


Slika 6 - dijagram vremena po putu- Uljanik



Slika 7 – dijagram brzina po putu – Uljanik





Slika 8 – dijagram ubrzanja po putu – Uljanik

RAZINA VODE	12 m
PORINAVAJUĆA TEŽINA	15250 m
TEŽIŠTE PORINJAVAJUĆE TEŽINE $X_g$ OD GLAVNOG REBRA	-14.5 m
TEŽIŠTE PORINJAVAJUĆE TEŽINE $Z_g$ OD BAZNE LINIJE	14.70 m
PUT KOD NAJVEĆEG TLAKA OKO KRAJA VLAKE	93 m
NAJVEĆI TLAK OKO KRAJEVA VLAKE	60.38 t/m <sup>2</sup>
OKRETANJE NAKON PUTA	127 m
TEŽINA KOD OKRETANJA	2872 t
NAJVEĆI GAZ KOD OKRETANJA	10.59 m
NAJMANJA METACENTARSKA VISINA	6.32 m
NAJMANJI MOMENT OKO KRAJEVA VLAKE	232500 tm
NAJVEĆA BRZINA	8.56 m/s
OTPLOV NAKON PUTA	203.60 m
REZERVA U DUZINI VLAKE	10.67 m
KRMENI GAZ U OTPLOVU	7.26 m
PRAMČANI GAZ U OTPLOVU	0.92 m
ZAUSTAVLJANJE NAKON PUTA (KOČENJE 40t NA 300m)	678 m

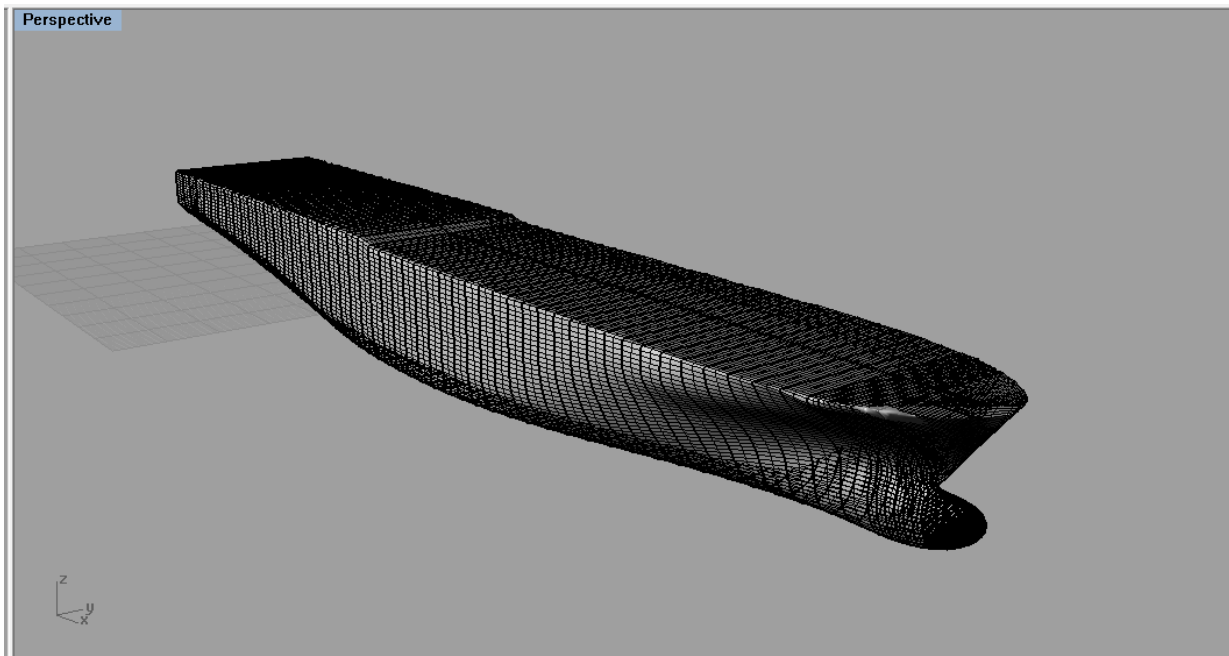
Tablica 2 – podaci dobiveni proračunom u brodogradilištu uljanik

## 2.3 GEOMETRIJSKA ANALIZA

Za određivanje „statičkih veličina“ potrebnih u dinamičkom proračunu porinuća broda koristili smo računalni program Rhinoceros 4.0.

Izračunate veličine su : konkretnije uzgon po duljini, momenti uzgona i težišta po duljini, oplakane površine po duljini i projicirane površine po duljini

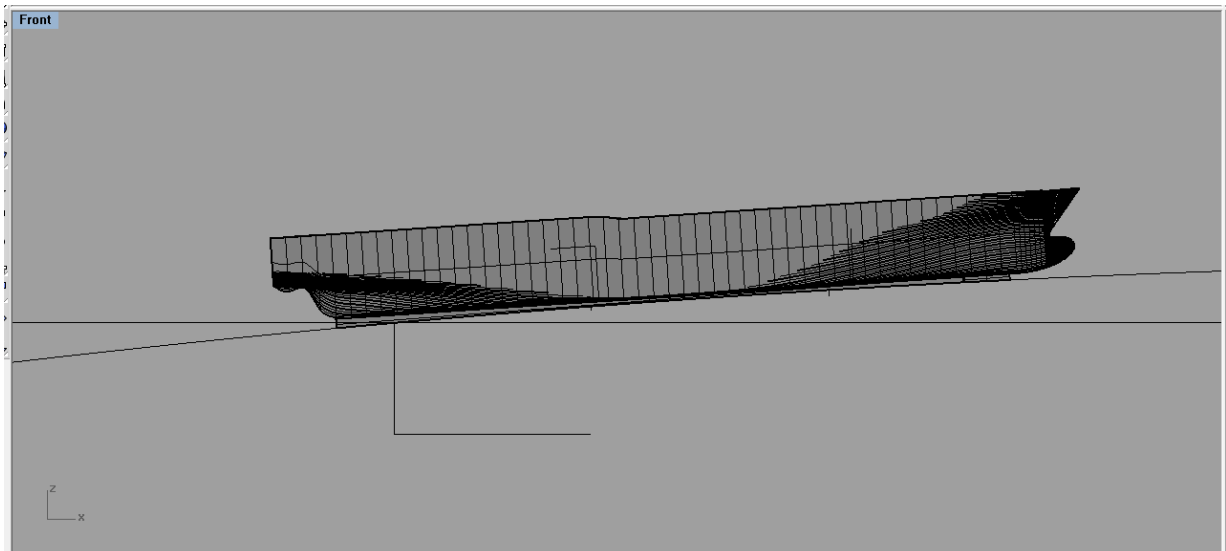
- Uzgon po duljini puta
- Momenti uzgona po duljini puta
- Momenti težišta po duljini puta
- Oplakane površine po duljini puta
- Projicirane površine po duljini puta



*Slika 9 – prikaz modelirane forme broda u rhinocerosu*

Iz brodogradilišta Uljanik smo dobili numerička očitavanja trupa broda, i nacrt rebara i vodnih linija. Rhinoceros ima mogućnost unošenja crteža iz pdf datoteka. Modeliranje trupa smo obavili tako da smo unjeli pdf sa nacrtom rebara i linije rebara smo rasporedili na zadane razmake. Preko dobivene žičane konstrukcije smo još prevukli površine i tako dobili volumen.

Za daljnji proračun trebalo je nacrtati liniju navoza na kojem smo pomicali brod i liniju vodostaja.



Slika 10 - prikaz broda na navozu u računalnom programu Rhinoceros

Rhinoceros ima mogućnost automatskog očitavanja nekih hidrostatičkih značajki, kako je dano u sljedećoj tablici.

Volume Displacement	10029.70		
Center of Buoyancy	225.38	0.00	-2.22
Wetted Surface Area	3976.41		
Waterline Length	121.70		
Maximum Waterline Beam	32.25		
Water Plane Area	3446.77		
Center of Floatation	230.21	0.00	0.00

Tablica 3 – primjer Rhinoceros izvještaja za konkretni kut pomaka na  $5.85^\circ$

Dobivanje svih podataka sa radilo na sljedeći način:

#### 1. Prva faza

Brod se postavi na početnu poziciju na zadanu visinu i dužinu od kraja navoza do težišta masa i očitamo dali odgovara kut između vektora težine broda i normale spuštene na navoz ( $3.40^\circ$ ). Tada rotiramo brod se oko centra zakrivljenosti navoza do točke kada saonice ne dotaknu vodnu . Tad očitamo novi kut ( $4.40^\circ$ ) i udaljenost koju je brod prošao, ovaj položaj nam označava završetak prve faze i početak druge. Postupak je prikazan slikom

## 2. Druga faza

Prvo izračunamo koliki je pomak kuta za naš odabrani korak (10m) i za taj kut pomičemo brod toliko puta dok brod ne dođe do treće faze porinuća. Postupak je prikazan slikom 11. Na svakom koraku očitavamo sljedeće veličine:

- Uzgon broda i saonica (daje rhino)
- Oplakanu površinu broda
- Projiciranu površinu broda u smjeru gibanja

Projiciranu površinu očitavamo tako da najveću uronjenu površinu presjeka broda prenesemo na neku plohu na koju se okomito giba brod.

## 3. Treća faza porinuća

Tijekom kraja druge faze provjeravamo moment uzgona oko koljevke. Kada moment uzgona preraste moment težine tada znamo da smo ušli u treću fazu. Očitavamo sljedeće vrijednosti:

- Udaljenost težišta istisnine (daje rhinoceros)
- Udaljenost težišta masa do ishodišta koordinatnog sustava
- Udaljenost okretišta (koljevke) do ishodišta koordinatnog sustava
- Uzgon (daje rhinoceros)
- Oplakanu površinu broda
- Projiciranu površinu broda u smjeru gibanja

Prilikom svakog koraka u trećoj fazi porinuća potrebno je brod dovesti u ravnotežno stanje. To se radi tako da se iterativno bord rotira oko koljevke dok se u excel tablici **x.x** momenti ne izjednače, obično je potrebno 4-5 iteracija

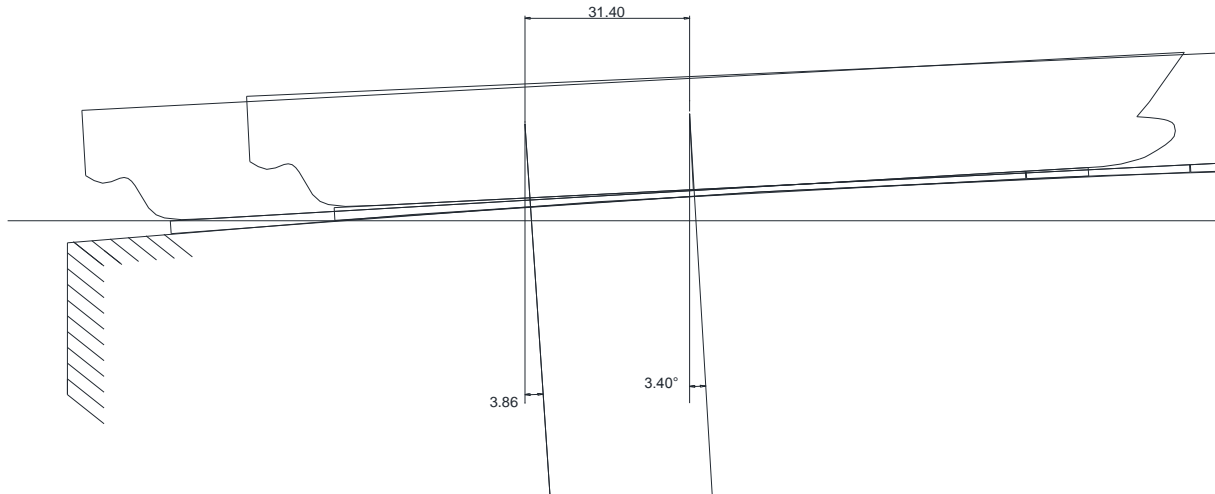
## 4. Četvrta faza porinuća

Nakon što brod siđe sa saonica brod se postavi na vodnu liniju otplova i očita se

- Oplakanu površinu broda
- Projiciranu površinu broda u smjeru gibanja

## 2.4 DIFERENCIJALNA JEDNADŽBA - URŠIĆ

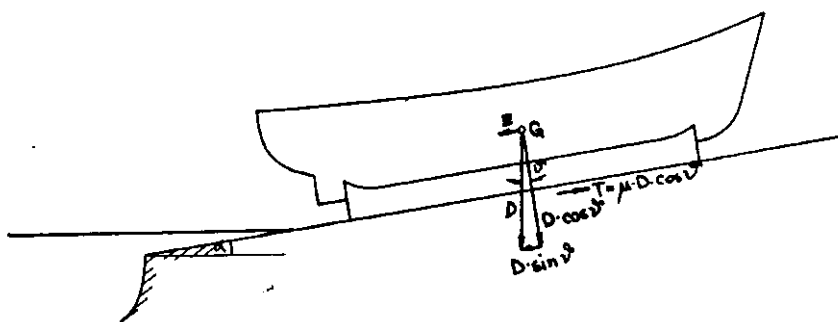
### 2.4.1 PRVA FAZA PORINUĆA



Slika 11 – prikaz ulaznih podataka iz Rhinoceros-a za prvu fazu porinuća

Na početku ove faze porinuća može se napisati rezultanta  $Z$  svih sila koje djeluju na brod u smjeru njegovoga gibanja

$$Z = D \cdot \cos(\vartheta) \cdot (\tan(\vartheta) - \mu) \quad [t] \quad (2.1)$$



Slika 12– sile koje djeluju na brod tijekom prve faze porinuća; [1]STABILITET BRODA 1 –  
J.Uršić

Gdje je sila trenja dana izrazom:

$$(2.2)$$

$$T = \mu \cdot D \cdot \cos(\vartheta) \quad [t] \quad (2.3)$$

Budući da je kut  $\vartheta$  vrlo malen kut možemo napisati jednadžbu 2.4

$$Z = D(\vartheta - \mu) \quad (2.4)$$

Ako je koeficijent trenja mirovanja  $\mu_0$  manji od kuta nagiba  $\vartheta$ , brod će sam od sebe krenuti niz navoz, kada se otpuste zapori koji pridržavaju saonice, ako je pak koeficijent mirovanja veći od kuta nagiba vlake, sila  $Z$  je negativna, dakle djeluje suprotno od gibanja broda, pa je treba nadvladati da se brod počne spuštati niz vlak. To se redovito radi tako da se brod gurne pomoću hidrauličkih preša.

Jednadžbe gibanja ne mijenjaju se za vrijeme cijele prve faze porinuća. U njoj je promjenjiv jedino koeficijent trenja  $\mu$ , koji pada od vrijednosti za mirovanje do vrijednosti koja vrijedi za gibanje. Brzine gibanja za vrijeme prve faze porinuća možemo proračunati iz ubrzanja:

$$b = g \cdot (\sin(\vartheta) - \mu \cdot \cos(\vartheta)) \quad [m/s^2] \quad (2.5)$$

Ako za koeficijent trenja gibanja  $\mu$  pretpostavimo neku srednju vrijednost, onda je ubrzanje u prvoj fazi porinuća za ravnu vlak, konstantno, pa bi vrijedilo da je gibanje jednoliko ubrzano. U ovom proračunu će se ipak staviti linearno povećanje faktora trenja za ovu fazu. Za naš slučaj brod se porinjiva sa zakrivljenog navoza, što znači da će kut nagiba porinjavanja rasti i biti sve veći, pa će i ubrzanje rasti.

Vodeći se tim uvjetima dobiva se sljedeći izraz za brzinu

$$v = \sqrt{2 \cdot \int_{x_2}^{x_1} b dx} \quad [m/s] \quad (2.6)$$

Vrijeme koje je potrebno da brod kod porinuća prevali put  $x$  nalazimo tako da brzinu broda  $v$ , proračunatu po formuli 2.6, numerički integriramo

$$t = \int_{x_2}^{x_1} \frac{1}{v} \cdot dx \quad [s] \quad (2.7)$$

## - PRORAČUN PRVE FAZE

$\beta+\epsilon$ °	$\beta+\epsilon$ rad	$\mu$	$g$ m/s <sup>2</sup>	$b$ m/s <sup>2</sup>	$x$ m	$\sum b$	$\sum \sum b$	$v^2/2$ m/s	$v$ m/s	$1/v$ s/m	$\sum 1/v$	$\sum \sum 1/v$	$t$ s
3.4	0.06	0.03	9.81	0.34	0		0	0	0	0		0	0
3.42	0.06	0.03	9.81	0.34	1.36	0.68	0.68	0.46	0.96	1.041673	1.04	1.04	1.44
3.44	0.06	0.03	9.81	0.34	2.72	0.68	1.36	0.93	1.36	0.734719	1.78	2.82	2.37
3.46	0.06	0.03	9.81	0.35	4.09	0.69	2.05	1.4	1.67	0.598393	1.33	4.15	2.88
3.48	0.06	0.03	9.81	0.35	5.45	0.7	2.75	1.87	1.93	0.516931	1.12	5.27	3.25
3.5	0.06	0.03	9.81	0.35	6.81	0.7	3.45	2.35	2.17	0.46121	0.98	6.24	3.53
3.52	0.06	0.03	9.81	0.36	8.17	0.71	4.16	2.83	2.38	0.419986	0.88	7.13	3.78
3.54	0.06	0.03	9.81	0.36	9.53	0.72	4.88	3.32	2.58	0.387877	0.81	7.93	3.98
3.56	0.06	0.03	9.81	0.36	10.89	0.72	5.61	3.82	2.76	0.361938	0.75	8.68	4.17
3.58	0.06	0.03	9.81	0.37	12.26	0.73	6.34	4.31	2.94	0.340409	0.7	9.39	4.33
3.6	0.06	0.03	9.81	0.37	13.62	0.74	7.08	4.82	3.1	0.322158	0.66	10.05	4.48
3.62	0.06	0.03	9.81	0.37	14.98	0.75	7.82	5.32	3.26	0.306426	0.63	10.68	4.62
3.64	0.06	0.03	9.81	0.38	16.34	0.75	8.57	5.84	3.42	0.292677	0.6	11.28	4.75
3.66	0.06	0.03	9.81	0.38	17.7	0.76	9.33	6.35	3.56	0.280524	0.57	11.85	4.87
3.68	0.06	0.03	9.81	0.38	19.06	0.77	10.1	6.88	3.71	0.269678	0.55	12.4	4.98
3.7	0.06	0.03	9.81	0.39	20.43	0.77	10.87	7.4	3.85	0.259918	0.53	12.93	5.09
3.72	0.06	0.03	9.81	0.39	21.79	0.78	11.65	7.93	3.98	0.251073	0.51	13.44	5.18
3.74	0.07	0.03	9.81	0.39	23.15	0.79	12.44	8.47	4.12	0.243006	0.49	13.93	5.28
3.76	0.07	0.03	9.81	0.4	24.51	0.79	13.23	9.01	4.24	0.235609	0.48	14.41	5.37
3.78	0.07	0.03	9.81	0.4	25.87	0.8	14.03	9.55	4.37	0.228793	0.46	14.88	5.45
3.8	0.07	0.03	9.81	0.41	27.23	0.81	14.84	10.1	4.49	0.222485	0.45	15.33	5.54
3.82	0.07	0.03	9.81	0.41	28.6	0.81	15.65	10.66	4.62	0.216624	0.44	15.77	5.62
3.84	0.07	0.03	9.81	0.41	29.96	0.82	16.47	11.21	4.74	0.21116	0.43	16.2	5.69
3.86	0.07	0.03	9.81	0.42	31.32	0.83	17.3	11.78	4.85	0.206048	0.42	16.61	5.76

Tablica 4 – proračun prve faze porinuća – diferencijalna jednadžba - Uršić

$\vartheta$  - kut nagiba vlake

$$\vartheta = \beta + \epsilon \quad (2.8)$$

Kut vlake ( $\beta$ ) se mijenja za ( $\epsilon$ ) svakim novim korakom, zato je potrebno odrediti koliko on iznosi u svakom pojedinom koraku

$\mu$  - faktor trenja

se mijenja linearno od 0.020 do 0.030

$g$  - gravitacijska konstanta [ $m/s^2$ ]

$b$  - ubrzanje na kraju svakog koraka

korsistimo izraz 2.6

Ubrzanje očito nije konstantno. Zato ga je potrebno računati za više koraka koji prate prvu fazu. Korake podjelimo po putu na jednake djelove



Numerički integriramo krivulju ubrzanja (2.6):

$$v = \sqrt{2 \cdot \int_{x_2}^{x_1} b dx} \quad [m/s]$$

$v$  - brzina broda na kraju svakog koraka

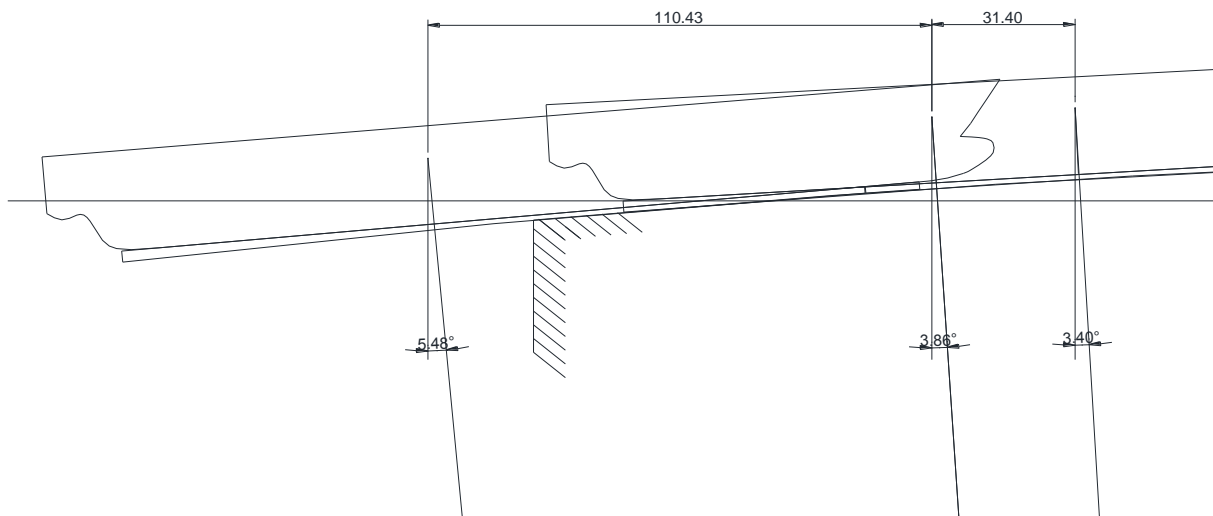
$x$  - prijeđeni put broda po odedenim koracima

numerički integriramo krivulju  $1/v$

$$t = \int_{x_2}^{x_1} \frac{1}{v} \cdot dx \quad [s]$$

$t$  - vrijeme potrebno da brod prijeđe zadani put

## 2.4.2 DRUGA FAZA PORINUĆA



Slika 13 – prikaz ulaznih podataka iz Rhina za drugu fazu porinuća

U drugoj fazi porinuća krma ulazi u vodu, pa na brod djeluju još dvije sile, sila uzgona  $U$  i sila otpora vode  $W$ , Jednadžba gibanja glasi onda:

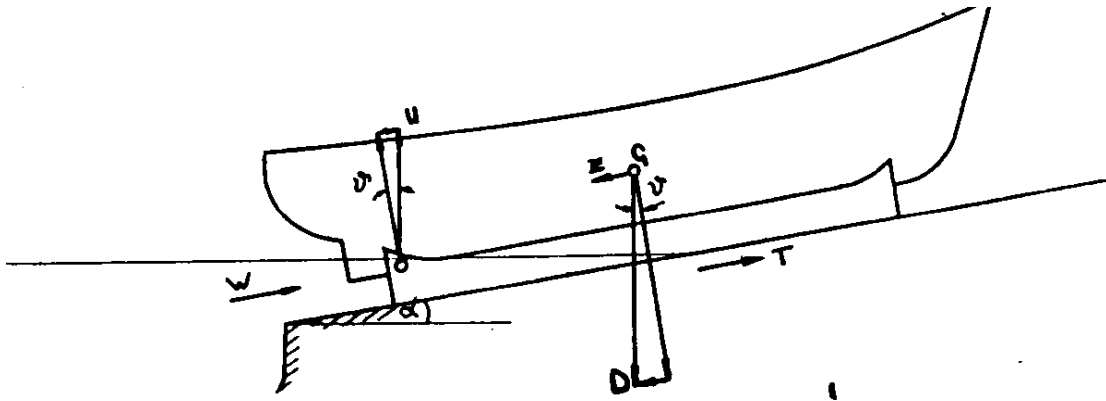
$$Z = (D - U) \cdot \sin(\nu) - \mu(D - U) \cos(\nu) - W \quad [t] \quad (2.9)$$

Sila trenja dana je sad formulom

$$T = \mu \cdot D \cdot \cos(\vartheta) \quad [t] \quad (2.10)$$

Kod ravne vlake kut  $\vartheta$  jednak je nagibu vlake, pa je konstantan, dok je u našem slučaju, kuržne vlake kut  $\nu = \beta + \varepsilon$ , pa se mijenja sa prevaljenim putem  $x$ . Budući da je otpor vode  $W$  približno proporcionalan sa kvadratom brzine gibanja, možemo ga izraziti:

$$W = k \cdot v^2 \quad [t] \quad (2.11)$$



Slika 14 – Sile koje djeluju na brod tijekom druge i treće faze porinuća; [1] STABILITET

BRODA 1 – J. Uršić

Iz gornje jednadžbe dobivamo

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = (D - U) \cdot (\sin(\nu) - \mu \cos(\nu)) - \frac{k}{D} g \left( \frac{d x}{dt} \right)^2 \quad (2.12)$$

Nadalje možemo uvesti supstitucije

$$Q = \frac{g \cdot (D - U) (\sin \nu - \mu \cos \nu)}{D} \quad (2.13)$$

$$P = \frac{k \cdot g}{D} \quad (2.14)$$

Integriranjem možemo dobiti sljedeći izraz

$$v^2 = \frac{2 \int_{x_1}^{x_2} Q \cdot e^{2 \int P dx} dx}{e^{\int_{x_1}^{x_2} P dx}} \quad [m/s] \quad (2.15)$$

Rješavanje gornjeg integrala nije jednostavno. Prvo i najlakše to možemo učiniti jest numerički integrirati nazivnik

$$e^{\int_{x_1}^{x_2} P dx}$$

Mada na prvi pogled izgleda da se može direktno kratiti sa članom u brojniku, treba primjetiti da u gornjem integralu nema granica.

$$e^{2\int P dx}$$

Do rješenja ovog integrala smo došli tako da smo za svaki korak raspisali jednadžbu pravca za P i tek tad smo ga integrirali.

$$P = \frac{P_2 - P_1}{x_2 - x_1}(x - x_1) - P_1 \quad (2.16)$$

Isti postupak raspisivanja jednadžbe pravca je trebalo je napraviti i za supstituciju Q

$$Q = \frac{Q_2 - Q_1}{x_2 - x_1}(x - x_1) - Q_1 \quad (2.17)$$

I tada dobijemo izraz:

$$v^2 = \frac{2 \int_{x_1}^{x_2} \frac{Q_2 - Q_1}{x_2 - x_1}(x - x_1) - Q_1 \cdot e^{2 \int_{x_2 - x_1}^{x_2 - x_1} (x - x_1) - P_1 dx} dx}{e^{2 \int_{x_1}^{x_2} P dx}} \quad (2.18)$$

Još je potrebno dodati izračunatoj brzini treba pridodati i brzinu na kraju prve faze u brojnik

$$v^2 = \frac{2 \int_{x_1}^{x_2} \frac{Q_2 - Q_1}{x_2 - x_1}(x - x_1) - Q_1 \cdot e^{2 \int_{x_2 - x_1}^{x_2 - x_1} (x - x_1) - P_1 dx} dx + v_0^2}{e^{2 \int_{x_1}^{x_2} P dx}} \quad (2.19)$$

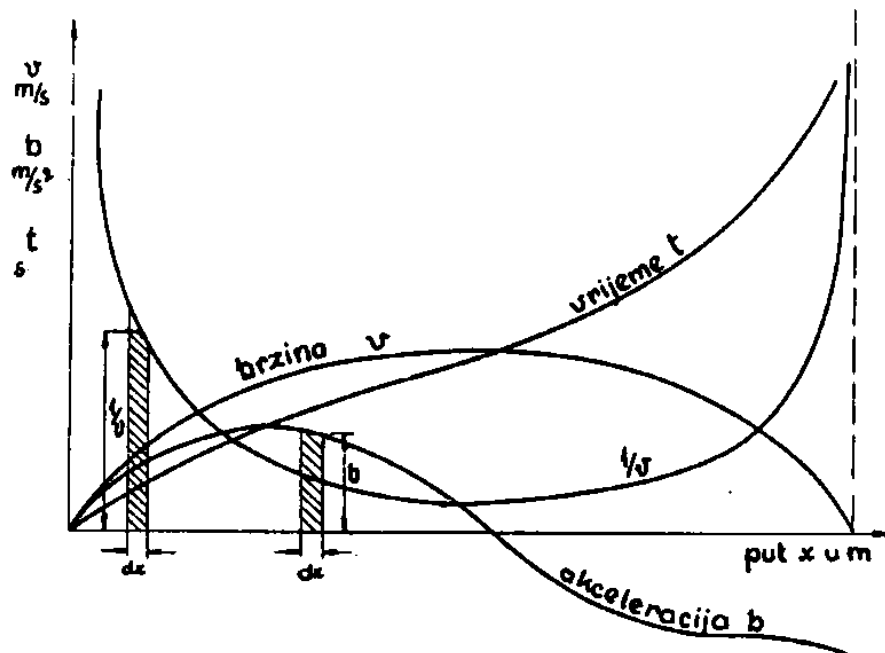
Ubrzanje broda u drugoj fazi porinuća dobijemo iz izraza 2.12

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = b$$

$$b = \frac{g \cdot (D - U)}{D} (\sin \nu - \mu \cos \nu) - P v^2 \quad [m/s^2] \quad (2.20)$$

Vrijeme u drugoj fazi porinuća je po izrazu 2.7 odnosno:

$$t = \int_{x_2}^{x_1} \frac{1}{v} \cdot dx \text{ [s]}$$



Slika 15 – karakteristični graf porinuća; [1]STABILITET BRODA 1 – J.Uršić

Kod određivanja otpora vode teško je odijeliti sam otpor broda od otpora štitova, koji se obično postavljaju na krmi, da se otpor poveća i brod zaustavi na kraćem putu nakon otplova. Kod proračuna obično zanemarujemo otpor brodske forme spram otpora štitova, pa u jednadžbi:

$$W = k \cdot v^2 \quad (2.21)$$

Određujemo k pomoću izraza:

$$k = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \zeta \cdot F \quad (2.22)$$

Pošto naš brod nema štitove „trebali“ bi smo koristiti Bensonov koeficijent:

$$k = 52.56 \cdot (0.63 \cdot A_1 + 0.004 \cdot A_2) \quad (2.23)$$

## - PRORAČUN MOMENATA

Potrebno je napraviti i proračun momenata koji djeluju na brod u drugoj i trećoj fazi porinuća da bi znali u svakom trenutku njegovu istisninu. Proračun momenata je potrebno napraviti i da bi odredili trenutak početak okretanja broda odnosno završetak druge faze i početak treće faze porinuća. Udaljenosti istisnine nam računalni program *Rhinoceros* daje automatski, a udaljenosti težišta i točke okretanja moramo ručno očitati

$\vartheta$	D	U1	U2	U=U1+U2	XU1	XU2	XT	X0	M
°	t	t	t	t	m	m	m	m	tm
4.38	15250.00	36.95		36.95					
4.53	15250.00	103.77		103.77	280.85		339.83	441.72	-1537128.12
4.67	15250.00	195.16	6.21	201.37	274.27	265.92	328.34	430.50	-1526428.22
4.82	15250.00	257.24	61.35	318.59	269.55	261.73	319.48	421.65	-1509154.12
4.97	15250.00	325.49	300.10	625.59	263.44	257.33	308.25	410.33	-1462991.78
5.11	15250.00	372.55	695.74	1068.29	258.46	254.07	299.39	401.49	-1401168.75
5.26	15250.00	417.95	1410.03	1827.98	252.93	250.48	289.85	391.91	-1298907.63
5.41	15250.00	464.67	2702.54	3167.21	246.45	245.87	278.95	381.10	-1129740.02
5.55	15250.00	502.30	4334.74	4837.04	240.69	240.91	269.42	371.58	-925762.80
5.70	15250.00	540.45	6717.92	7258.37	234.49	234.20	259.21	361.39	-635175.49
5.85	15250.00	577.46	10029.70	10607.16	228.34	225.38	249.00	351.91	-228981.52
6.00	15250.00	603.75	11761.10	12364.85	221.06	217.03	238.80	341.00	-28102.47
6.14	15250.00	624.94	12195.40	12820.34	214.04	210.08	229.44	331.62	-2533.26
6.29	15250.00	652.31	12526.40	13178.71	206.95	202.93	219.29	321.45	1389.30
6.44	15250.00	687.85	12838.20	13526.05	200.68	196.16	209.17	311.28	-3164.95
6.58	15250.00	734.53	13226.20	13960.73	196.82	190.11	199.73	301.78	-2185.03
6.73	15250.00	785.79	13750.90	14536.69	192.48	183.88	189.62	291.62	3942.37

Tablica 5 – proračun ravnoteže momenata u drugoj i trećoj fazi porinuća broda

$M$  – ravnoteža momenata u drugoj i trećoj fazi porinuća broda

$$M = U_1(X_o - X_{U1}) + U_2(X_o - X_{U2}) + D_1(X_o - X_T) [tm] \quad (2.24)$$

$D$  - težina broda [t]

$\nu$  - kut nagiba vlake

$$\vartheta = \beta + \varepsilon [rad]$$

$U_1$  - Istisnina saonica [t]

$U_2$  - Istisnina saonica [t]

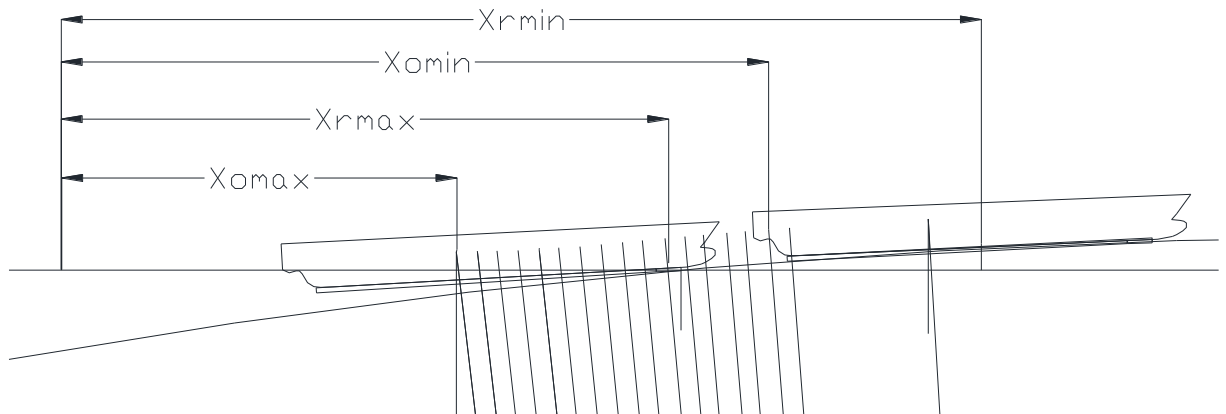
$U$  - ukupna istisnina [t]

$X_{U1}$  - udaljenost težišta istisnine saonica od proizvoljnog koordinatnog sustava [m]

$X_{U2}$  - udaljenost težišta istisnine broda od proizvoljnog koordinatnog sustava [m]

$X_T$  - udaljenost težišta broda od proizvoljnog koordinatnog sustava [m]

$X_O$  - udaljenost Točke okretanja broda od proizvoljnog koordinatnog sustava [m]



Slika 16 – prikaz krakova momenata koje je potrebno očitati iz računalnog programa

*Rhinocerus*

Razlog zašto u u trećoj fazi razlika momenata nije 0, zato jer je jako teško podesiti kut rotacije broda za svaki slučaj, pa se uzima da je ovo dovoljno dobro.

## - PRORAČUN BENSONOVOG KOEFICIJENTA

x m	A <sub>11</sub>	A <sub>12</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>21</sub>	A <sub>22</sub>	A <sub>2</sub>	k
0.00	4.96		4.96	99.92		99.92	185.09
10.00	8.38		8.38	213.61		213.61	322.40
20.00	16.37		16.37	406.04	28.71	434.75	633.46
30.00	16.37	3.26	19.63	548.33	135.83	684.16	793.80
40.00	16.37	10.96	27.33	714.99	392.16	1107.16	1137.59
50.00	16.37	21.36	37.73	837.37	691.88	1529.25	1570.74
60.00	16.37	97.19	113.56	961.92	1118.18	2080.10	4197.55
70.00	16.37	106.20	122.57	1096.94	1700.16	2797.10	4646.80
80.00	16.37	186.43	202.80	1210.20	2271.67	3481.87	7447.20
90.00	16.37	240.24	256.61	1327.94	3037.31	4365.25	9414.66
100.00	16.37	296.87	313.24	1443.28	3976.41	5419.69	11511.56
110.00	16.37	336.34	352.71	1557.47	4699.85	6257.32	12994.85
120.00	16.37	328.92	345.29	4790.41	1617.78	6408.19	12780.61
130.00	16.37	314.39	330.76	4833.66	1692.40	6526.06	12324.33
140.00	16.37	300.68	317.05	4886.36	1791.89	6678.25	11902.35
150.00	16.37	284.95	301.32	4873.54	1917.34	6790.88	11405.30
160.00	16.37	268.21	284.58	4837.50	2022.38	6859.88	10865.56

Tablica 6 - proračun bensonovog koeficijenta

$k$  - bensonov koeficijent

Računa se po formuli (2.23)

$A_{11}$  - uronjena projekcirana površina saonica u smjeru gibanja broda [ $m^2$ ]

$A_{12}$  - uronjena projekcirana površina saonica u smjeru gibanja broda [ $m^2$ ]

$A_{21}$  - uronjena projekcirana površina broda u smjeru gibanja broda [ $m^2$ ]


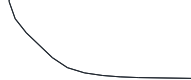












$A_{12}$  - uronjena površina saonica [ $m^2$ ]

$A_1$  - uronjena površina broda [ $m^2$ ]

$A_2$  - uronjena površina broda [ $m^2$ ]

Očigledno su Bensonovi koeficijenti preveliki, stime i neupotrebljivi. Nadalje ćemo koristiti uljanikovu iskustvenu formulu za koeficijent otpora, koji je pokazao veliku podudarnost sa trećim danim izrazom za koeficijent otpora, ali zbog praktičnosti će so koristiti uljanikov koeficijent



x	A11	A12	x	A11	A12
160		<input type="checkbox"/>	70		<input type="checkbox"/>
150		<input type="checkbox"/>	60		<input type="checkbox"/>
140		<input type="checkbox"/>	50		<input type="checkbox"/>
130		<input type="checkbox"/>	40		<input type="checkbox"/>
120		<input type="checkbox"/>	30		<input type="checkbox"/>
100		<input type="checkbox"/>	20		<input type="checkbox"/>
90		<input type="checkbox"/>	10		<input type="checkbox"/> 10
80		<input type="checkbox"/>	0		<input type="checkbox"/> 0

Slika 17 – prikaz projiciranih površina broda i saonica

## - PRORAČUN DRUGE FAZE PORINUĆA

x	D	g	U1	U2	U=U1+U2		$\beta+\epsilon$	$\mu$
m	t	m/s <sup>2</sup>	t	t	t		rad	
0	15250	9.81	36.9462		36.9462	3.86	0.067336	0.03
10	15250	9.81	103.773		103.773	4.006874	0.069898	0.03
20	15250	9.81	195.158	6.21023	201.3682	4.153748	0.07246	0.03
30	15250	9.81	257.244	61.3453	318.5893	4.300621	0.075022	0.03
40	15250	9.81	325.488	300.103	625.591	4.447495	0.077584	0.03
50	15250	9.81	372.547	695.744	1068.291	4.594369	0.080146	0.03
60	15250	9.81	417.945	1410.03	1827.975	4.741243	0.082708	0.03
70	15250	9.81	464.672	2702.54	3167.212	4.888117	0.08527	0.03
80	15250	9.81	502.3	4334.74	4837.04	5.03499	0.087833	0.03
90	15250	9.81	540.446	6717.92	7258.366	5.181864	0.090395	0.03
100	15250	9.81	577.457	10029.7	10607.16	5.328738	0.092957	0.03
110	15250	9.81	603.752	11761.1	12364.85	5.475612	0.095519	0.03
120	15250	9.81	624.939	12195.4	12820.34	5.622485	0.098081	0.03
130	15250	9.81	652.307	12526.4	13178.71	5.769359	0.100643	0.03
140	15250	9.81	687.85	12838.2	13526.05	5.916233	0.103205	0.03
150	15250	9.81	734.534	13226.2	13960.73	6.063107	0.105768	0.03
160	15250	9.81	785.785	13750.9	14536.69	6.209981	0.10833	0.03

Tablica 7 – prvi dio proračuna druge faze porinuća – diferencijalna jednadžba - Uršić

x	Q	k	P	$\sum P$	$\sum \sum P$	$\int p dx$		$e^{(2 \int P dx)}$
m								
0	0.365542	0.007389	4.75E-06		0	0	0	1
10	0.388892	0.020755	1.34E-05	1.81E-05	1.81E-05	9.05E-05	0.000181	1.000181
20	0.411179	0.040274	2.59E-05	3.93E-05	5.74E-05	0.000287	0.000574	1.000574
30	0.432573	0.063718	4.1E-05	6.69E-05	0.000124	0.000621	0.001243	1.001243
40	0.447768	0.125118	8.05E-05	0.000121	0.000246	0.001229	0.002457	1.00246
50	0.457569	0.213658	0.000137	0.000218	0.000464	0.002318	0.004637	1.004647
60	0.455161	0.365595	0.000235	0.000373	0.000836	0.004181	0.008363	1.008398
70	0.42964	0.633442	0.000407	0.000643	0.001479	0.007395	0.014789	1.014899
80	0.387406	0.967408	0.000622	0.00103	0.002509	0.012544	0.025087	1.025404
90	0.310477	1.451673	0.000934	0.001556	0.004065	0.020324	0.040649	1.041485
100	0.188017	2.121431	0.001365	0.002299	0.006363	0.031817	0.063634	1.0657
110	0.121585	2.47297	0.001591	0.002955	0.009319	0.046594	0.093189	1.097666
120	0.106387	2.564068	0.001649	0.00324	0.012559	0.062795	0.125591	1.133814
130	0.094102	2.635741	0.001696	0.003345	0.015904	0.07952	0.15904	1.172379
140	0.081157	2.70521	0.00174	0.003436	0.01934	0.096699	0.193397	1.213358
150	0.062814	2.792147	0.001796	0.003536	0.022876	0.11438	0.228761	1.257032
160	0.035926	2.907337	0.00187	0.003666	0.026542	0.132712	0.265424	1.303974

Tablica 8 – drugi dio proračuna druge faze porinuća – diferencijalna jednadžba - Uršić

x	v	b	1/v	$\sum 1/v$	$\sum \sum 1/v$	t
m	m/s	m/s <sup>2</sup>	s/m			s
0	6.14	0.365363	0.162866		0	0
10	7.16	0.388208	0.139665	0.302531	0.302531	0.777858
20	8.19	0.409441	0.1221	0.261765	0.564296	1.062352
30	8.22	0.429804	0.121655	0.243755	0.808051	1.27126
40	8.23	0.442316	0.121507	0.243161	1.051212	1.449974
50	8.23	0.44826	0.121507	0.243013	1.294225	1.608866
60	8.21	0.439309	0.121803	0.243309	1.537535	1.753588
70	8.13	0.402706	0.123001	0.244804	1.782339	1.888035
80	8.04	0.347179	0.124378	0.247379	2.029718	2.014804
90	7.86	0.252786	0.127226	0.251605	2.281323	2.136035
100	7.52	0.110844	0.132979	0.260205	2.541528	2.254563
110	7.23	0.038428	0.138313	0.271291	2.812819	2.371843
120	7.08	0.023708	0.141243	0.279556	3.092375	2.486916
130	6.95	0.012205	0.143885	0.285128	3.377502	2.599039
140	6.83	-2.1E-05	0.146413	0.290298	3.6678	2.708431
150	6.7	-0.01781	0.149254	0.295667	3.963467	2.815481
160	6.62	-0.04604	0.151057	0.300311	4.263778	2.920198

Tablica 9 – drugi dio proračuna druge faze porinuća – diferencijalna jednačba - Uršić

$x$  - prijeđeni put broda po određenim koracima [m]

$D$  - težina broda [t]

$g$  - gravitacijska konstanta [ $m/s^2$ ]

$U_1$  - Istisnina saonica [t]

$U_2$  - Istisnina broda [t]

$U$  - ukupna istinina [t]

$\vartheta$  - kut nagiba vlake

$\vartheta = \beta + \varepsilon$  [rad]

Kut vlake se mijenja sa svakim novim korakom, zato je potrebno odrediti koliko on iznosi u svakom pojedinom koraku. Posebnu pozornost treba obratiti u trećoj fazi gdje se brod još i zakreće

$\mu$  - faktor trenja

je konstanta - 0.030

$k$  – koeficijent otpora broda

$$k = 0.0002 \cdot U \cdot v^2 \quad (2.25)$$

$Q$  – supstitucija računamo prema formuli (2.44)

Izračunamo po izrazu (2.13)

$P$  – supsitucija

Računa se po izrazu (2.14)

$v$  – brzina gibanja broda

Računa se po izrazu (2.19)

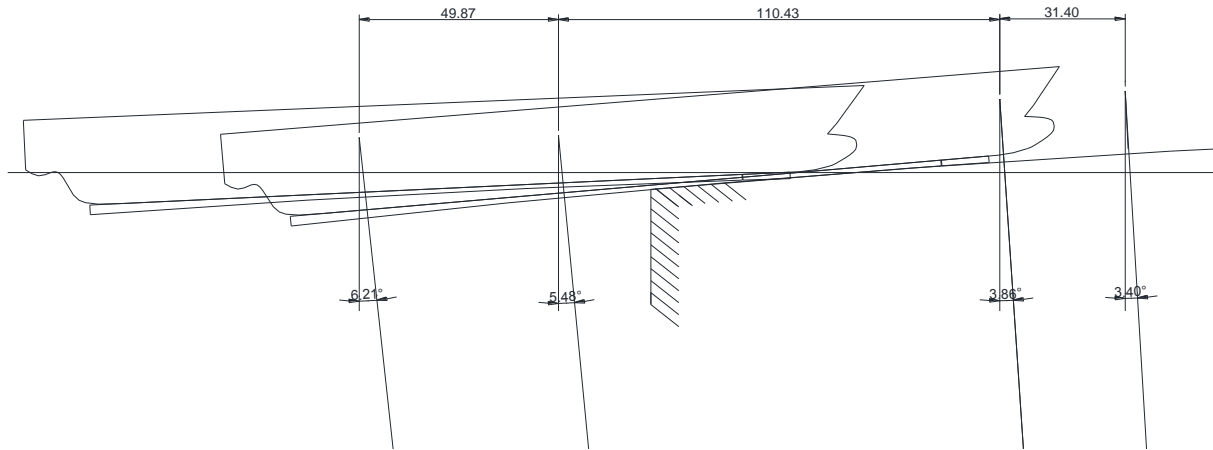
$v_0$  - brzina na kraju prve faze

Potrebno je numerički integrirati funkciju  $1/v$

$t$  - vrijeme potrebno da brod prijeđe zadani put

Računa se po izrazu (2.7)

### 2.4.3 TREĆA FAZA PORINUĆA



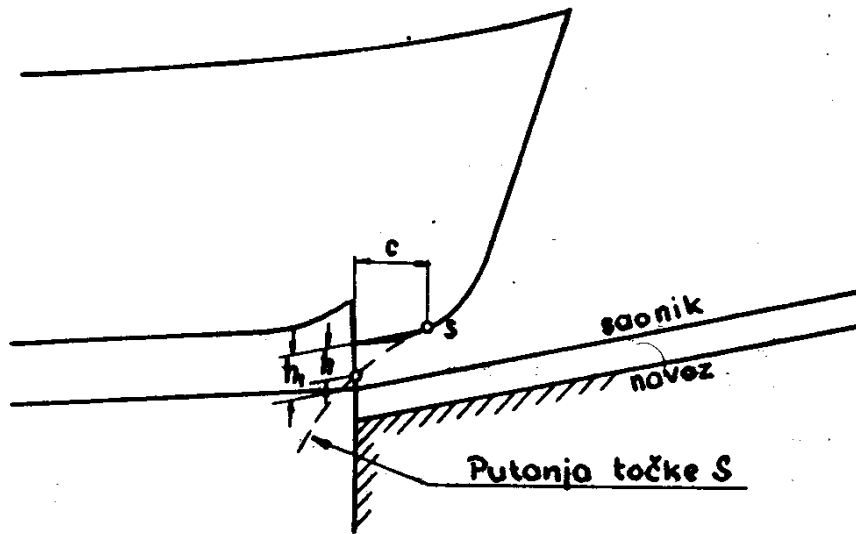
Slika 18 – prikaz ulaznih podataka iz Rhinocerosa za treću fazu porinuća

Formule za treću fazu porinuća su identične kao i u drugoj fazi, zato jer djeluje iste sile na brod. Na kraju treće faze, odnosno na početku četvrte, kada čelo napušta vlak, brod gubi uporište, pa treba ispitati da li je njegova brzina dovoljna da spriječi udarac pramca o vlak. Ta kontrola se vrši na sljedeći način,

Proračunamo visinu  $h$  za koju padne najviše ugrožena točka na pramcu kad prednji brid saona izgubi uporište. Iz zakona za slobodni pad dobivamo :  $h = g/2 \cdot t^2$

na kratkom putu  $c$ , za koji je udaljena tačka  $S$  od čela saona, možemo smatrati da je brzina  $v$  konstanta, pa vrijedi izraz:  $t = c/v$ . uvrstimo to u formulu za  $h$ , pa dobivamo:

$$h = \frac{g \cdot c^2}{2 \cdot v^2} \quad (2.26)$$



Slika 19 – Određivanje dopuštene veličine skraćenja dovodnog dijela vlake; [1]STABILITET  
BRODA 1 – J.Uršić

Ovu veličinu nije potrebno računati zato jer je vodostaj prevelik u trenutku razmatranog porinuća i brod počne napuštati vlak u prije nego što dođe do praga.

#### 2.4.4 ČETVRTA FAZA PORINUĆA

Kod slobodnog otplova na brod djeluje samo sila otpora vode uz silu inercije, budući da je uzgon jednak težini, pa je njihova rezultanta jednaka nuli. Jednadžba gibanja za četvrtu fazu porinuća glasi dakle

$$\Delta \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = -k \cdot v^2 \quad (2.27)$$

raščlambom gornje jednadžbe dobijemo izraz za brzinu

$$v = v_0 \cdot e^{-\frac{k}{\Delta} x} \quad [m/s^2] \quad (2.28)$$

koeficijent otpora vode za brod i saone možemo izračunati pomoću formule:

$$k = \xi \cdot \Delta^{\frac{2}{3}} \quad (2.29)$$

gdje je

$$\xi = 0,005$$

ili pomoću Bensonove formule

Prema gornjoj formuli dobili smo krivulju brzine, koja se asimptotski približava apscisnoj osi, dakle brod bi se teoretski zaustavio ( $v=0$ ), tek nakon neizmjerljivo dugog puta ( $x=\infty$ ). praktički se zaustavi nakon konačnog puta, jer kod manjih brzina umjesto kvadratnog zakona otpora, koji smo prepostavili kod izvoda formule za brzinu, vrijedi linearni zakon otpora. eksponencijalnu krivulju možemo dakle za brzine ispod 1m/sek nadomjestiti pravcem. Nagib tog pravca nalazimo pomoću jednadžbe gibanja, koju pišemo u obliku:

$$\Delta \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = -k \cdot v^2 \quad (2.30)$$

ako linearni zakon gibanja počne vrijediti nakon puta  $x_0$ , kojemu odgovara brzina  $v_0$ , onda je:

$$v = v_0 - \frac{k(x - x_0)}{\Delta} \quad [m/s^2] \quad (2.31)$$

## - PRORAČUN ČETVIRTE FAZE PORINUĆA

x	v0	D	k	v	b	1/v	$\sum 1/v$	$\sum \sum 1/v$	t
m	m/s	t		m/s	m/s <sup>2</sup>	s/m			s
0	6.62	15250	3	6.62	-0.00862	0		0	0
10	6.62	15250	3	6.60699	-0.00859	0.151355	0.151355	0.151355	0.550191
20	6.62	15250	3	6.581047	-0.00852	0.151951	0.303306	0.454661	0.953584
30	6.62	15250	3	6.542324	-0.00842	0.152851	0.304802	0.759464	1.232448
40	6.62	15250	3	6.491047	-0.00829	0.154058	0.306909	1.066373	1.460392
50	6.62	15250	3	6.427515	-0.00813	0.155581	0.309639	1.376012	1.658923
60	6.62	15250	3	6.352098	-0.00794	0.157428	0.313009	1.689022	1.837945
70	6.62	15250	3	6.265229	-0.00772	0.159611	0.317039	2.006061	2.003028
80	6.62	15250	3	6.167403	-0.00748	0.162143	0.321754	2.327815	2.157691
90	6.62	15250	3	6.059174	-0.00722	0.165039	0.327182	2.654997	2.304342
100	6.62	15250	3	5.941145	-0.00694	0.168318	0.333357	2.988354	2.44473
110	6.62	15250	3	5.813968	-0.00665	0.172	0.340317	3.328671	2.580182
120	6.62	15250	3	5.678331	-0.00634	0.176108	0.348108	3.676778	2.711744
130	6.62	15250	3	5.53496	-0.00603	0.18067	0.356778	4.033556	2.840266
140	6.62	15250	3	5.384606	-0.0057	0.185715	0.366384	4.399941	2.966459
150	6.62	15250	3	5.228042	-0.00538	0.191276	0.376991	4.776932	3.090932
160	6.62	15250	3	5.066055	-0.00505	0.197392	0.388668	5.1656	3.214218
170	6.62	15250	3	4.89944	-0.00472	0.204105	0.401497	5.567097	3.336794
180	6.62	15250	3	4.728992	-0.0044	0.211462	0.415567	5.982664	3.459093
190	6.62	15250	3	4.555504	-0.00408	0.219515	0.430976	6.41364	3.581519
200	6.62	15250	3	4.379756	-0.00377	0.228323	0.447838	6.861478	3.704451
210	6.62	15250	3	4.202514	-0.00347	0.237953	0.466276	7.327754	3.828251
220	6.62	15250	3	4.024519	-0.00319	0.248477	0.48643	7.814184	3.953273
230	6.62	15250	3	3.846489	-0.00291	0.259977	0.508454	8.322638	4.079862
240	6.62	15250	3	3.66911	-0.00265	0.272546	0.532523	8.855161	4.208363
250	6.62	15250	3	3.493033	-0.0024	0.286284	0.55883	9.413991	4.339122
260	6.62	15250	3	3.31887	-0.00217	0.301307	0.587592	10.00158	4.47249
270	6.62	15250	3	3.147194	-0.00195	0.317743	0.619051	10.62063	4.608825
280	6.62	15250	3	2.978533	-0.00175	0.335736	0.653479	11.27411	4.748497
290	6.62	15250	3	2.813371	-0.00156	0.355445	0.691181	11.96529	4.89189
300	6.62	15250	3	2.652145	-0.00138	0.377053	0.732499	12.69779	5.039403
310	6.62	15250	3	2.495245	-0.00122	0.400762	0.777815	13.47561	5.191456
320	6.62	15250	3	2.343014	-0.00108	0.426801	0.827563	14.30317	5.34849
330	6.62	15250	3	2.195746	-0.00095	0.455426	0.882227	15.1854	5.51097
340	6.62	15250	3	2.053691	-0.00083	0.486928	0.942354	16.12775	5.679393
350	6.62	15250	3	1.917052	-0.00072	0.521634	1.008562	17.13631	5.854283
360	6.62	15250	3	1.785986	-0.00063	0.559915	1.081549	18.21786	6.036201
370	6.62	15250	3	1.660612	-0.00054	0.602188	1.162102	19.37996	6.225747
380	6.62	15250	3	1.541004	-0.00047	0.648927	1.251115	20.63108	6.423563
390	6.62	15250	3	1.427201	-0.0004	0.700672	1.3496	21.98068	6.630336
400	6.62	15250	3	1.319205	-0.00034	0.758032	1.458704	23.43938	6.846807
410	6.62	15250	3	1.216984	-0.00029	0.821703	1.579736	25.01912	7.073771
420	6.62	15250	3	1.120478	-0.00025	0.892476	1.71418	26.7333	7.312086
430	6.62	15250	3	1.029597	-0.00021	0.971253	1.86373	28.59703	7.562675

Tablica 9 – proračun četvrte faze porinuća – diferencijalna jednadžba - Uršić



$x$  - prijeđeni put broda po odeđenim koracima [m]

$v_0$  - brzina gibanja broda na početku četvte faze faze porinuća broda [m/s]

$D$  - težina broda [t]

$$k = \xi \cdot W^{\frac{2}{3}}$$

$k$  – koeficijent otpora

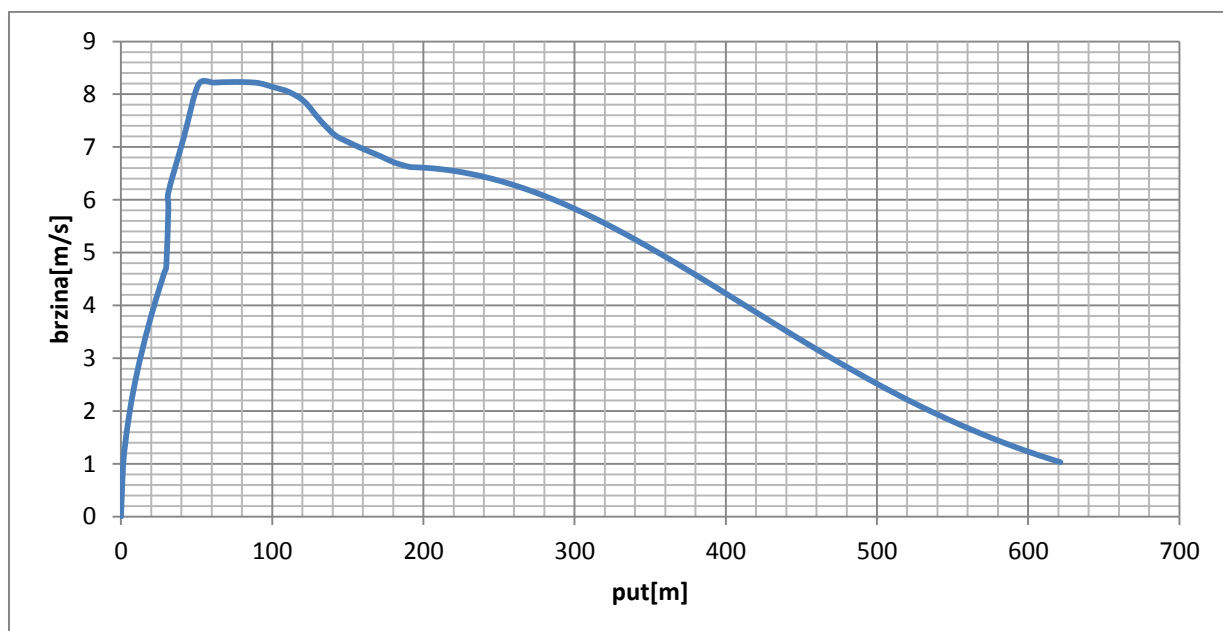
$v$  - brzina gibanja broda [m/s]

Računa se po izrazu (2.28)

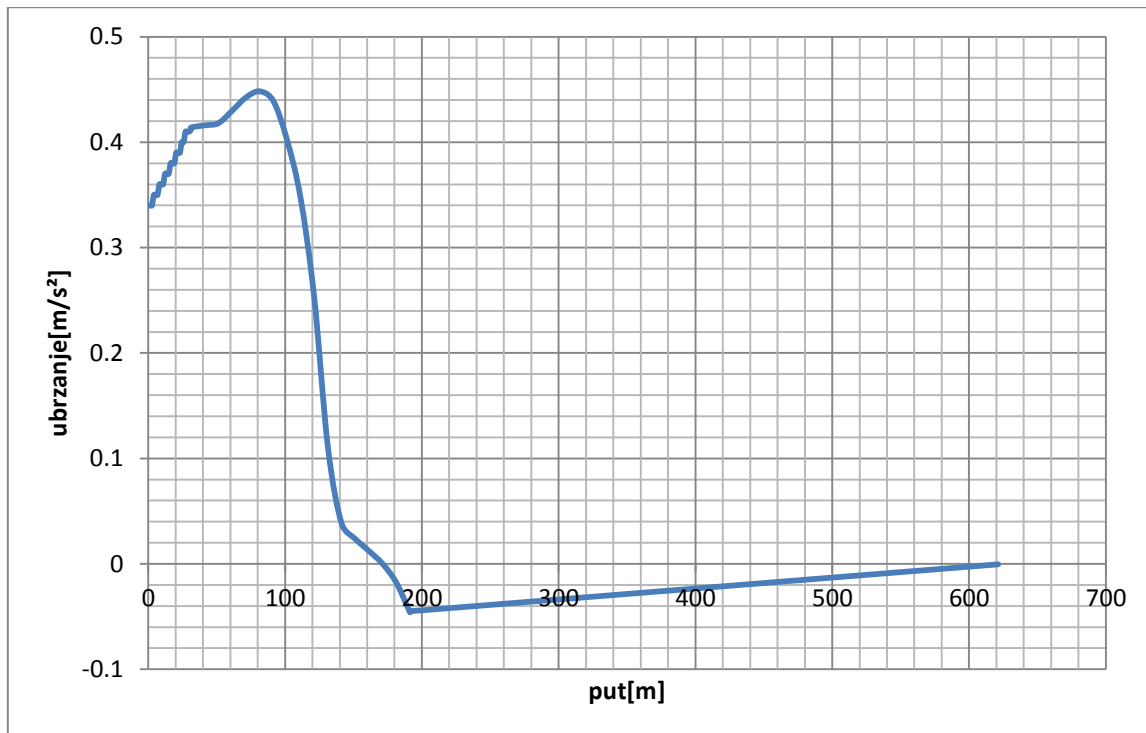
Kao i u prethodnim fazama potrebno je numerički integrirati funkciju  $1/v$

$t$  - vrijeme potrebno da brod prijeđe zadani put

računa se po izrazu (2.7)



Slika 20 – dijagram brzina po putu broda – diferencijalna jedandžba - Uršić



Slika 21 – dijagram ubrzanja po putu broda – diferencijalna jedandžba – Uršić

## 2.5 DRUGA METODA

Umjesto da postavimo diferencijalnu jednadžbu gibanja moguće je izračunati brzine broda kod porinuća i iz bilance energije. Na početku porinuća brod ima maksimalnu potencijalnu energiju, koja se prilikom spuštanja broda u vodu pretvara u kinetičku energiju, koja se troši prilikom svladavanja radnje otpora trenja i otpora vode.

U četvrtoj fazi porinuća više nema potencijalne energije, njegovu preostalu kinetičku energiju potrošit će otpor vode i otpor sredstva za kočenje

Budući da se otpor trenja i otpor vode stalno mijenjaju na putu koji prelazi brod za vrijeme porinuća, da odredimo izraz za radnju otpora trenja i otpora vode, razdjelimo cijeli put porinuća u dovoljno male intervale u kojima možemo pretpostaviti da su spomenuti otpori konstantni. Ako sa  $x'$  označimo dužinu pojedinog intervala, a sa  $v_1$  brzinu broda na početku intervala, odnosno sa  $v_2$  brzinu na kraju intervala, onda dobivamo slijedeće izraze:

gubitak potencijalne energije:

$$D \cdot x' \cdot \sin \vartheta [t]$$

porast kinetičke energije :

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{D}{g} \cdot v_2^2 - v_1^2 [t]$$

radnja utrošena na svladavanje trenja u smjeru kosine navoza

$$\mu(D-U)x' \cos \vartheta [t]$$

radnja utrošena na svladavanje otpora vode:

$$W \cdot x' [t]$$

Jednadžba bilance energije za drugu i treću fazu porinuća glasi:

$$D \cdot x' \cdot \sin \vartheta = \frac{1}{2} \cdot \frac{D}{g} \cdot (v_2^2 - v_1^2) + \mu(D-U)x' \cos \vartheta + W \cdot x' + U \cdot x' \cdot \sin \vartheta \quad (2.32)$$

Ako za otpor vode  $W$  uvrstimo srednju vrijednost na početku i kraju intervala  $x'$ :

$$W = k \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \quad [t] \quad (2.33)$$

Možemo iz gornje jednadžbe proračunati brzinu  $v_2$  na kraju intervala , ako je poznata brzina  $v_1$  na početku intervala

$$v_2^2 = \frac{D - U \cdot x' \cdot \sin \vartheta + 2 \cdot \mu \cdot (D - U) \cdot x' \cdot \cos \vartheta + v_1^2 \left( \frac{D}{g \cdot x'} - k \right)}{\left( \frac{D}{g \cdot x'} + k \right)} \quad [m/s^2] \quad (2.34)$$

Kao brzine  $v_l$  u pojedinim intervalima odabiremo uvijek izračunatu brzinu  $v_2$  u prethodnom intervalu.

### 2.5.1 PRVA FAZA

U prvoj fazi porinuća, kad nema još otpora vode, zgodno je odabrati veće intervale  $x'$ , nego kasnije prema kraju porinuća odabiremo intervale sve manje i manje.

Međutim to vrijedi samo za navoze sa ravnim navozom, a naš navoz iz proračuna ima zakrivljenosti

U prvoj fazi porinuća jednadžba bilance energije glasi, ako je uzeti da je  $v_0 = 0$ ,  $k = 0$ ,  $U = 0$ ,  $x'$  je jednak kružnom isječku kuta  $\varepsilon$

$$v_2^2 = \frac{D \cdot x' \cdot \sin \vartheta + 2 \cdot \mu \cdot D \cdot x' \cdot \cos \vartheta + v_1^2 \left( \frac{D}{g \cdot x'} - k \right)}{\left( \frac{D}{g \cdot x'} + k \right)} \quad \left[ \left( \frac{m}{s} \right)^2 \right] \quad (2.35)$$

## - PRORAČUN PRVE FAZE PORINUĆA

x	$\beta+\epsilon$	$\mu$	D	$\beta+\epsilon$	g	x'	v1	v2
m	°		t	rad	m/s <sup>2</sup>	m	m/s	m/s
0	3.40	0.03	14720.00	0.06	9.81	1.36	0.00	0.96
1.36	3.42	0.03	14720.00	0.06	9.81	1.36	0.96	1.36
2.72	3.44	0.03	14720.00	0.06	9.81	1.36	1.36	1.67
4.09	3.46	0.03	14720.00	0.06	9.81	1.36	1.67	1.93
5.45	3.48	0.03	14720.00	0.06	9.81	1.36	1.93	2.16
6.81	3.50	0.03	14720.00	0.06	9.81	1.36	2.16	2.38
8.17	3.52	0.03	14720.00	0.06	9.81	1.36	2.38	2.57
9.53	3.54	0.03	14720.00	0.06	9.81	1.36	2.57	2.76
10.89	3.56	0.03	14720.00	0.06	9.81	1.36	2.76	2.93
12.26	3.58	0.03	14720.00	0.06	9.81	1.36	2.93	3.10
13.62	3.60	0.03	14720.00	0.06	9.81	1.36	3.10	3.26
14.98	3.62	0.03	14720.00	0.06	9.81	1.36	3.26	3.41
16.34	3.64	0.03	14720.00	0.06	9.81	1.36	3.41	3.56
17.7	3.66	0.03	14720.00	0.06	9.81	1.36	3.56	3.70
19.06	3.68	0.03	14720.00	0.06	9.81	1.36	3.70	3.84
20.43	3.70	0.03	14720.00	0.06	9.81	1.36	3.84	3.97
21.79	3.72	0.03	14720.00	0.06	9.81	1.36	3.97	4.11
23.15	3.74	0.03	14720.00	0.07	9.81	1.36	4.11	4.23
24.51	3.76	0.03	14720.00	0.07	9.81	1.36	4.23	4.36
25.87	3.78	0.03	14720.00	0.07	9.81	1.36	4.36	4.48
27.23	3.80	0.03	14720.00	0.07	9.81	1.36	4.48	4.61
28.6	3.82	0.03	14720.00	0.07	9.81	1.36	4.61	4.72
29.96	3.84	0.03	14720.00	0.07	9.81	1.36	4.72	4.84
31.32	3.86	0.03	14720.00	0.07	9.81	1.36	4.84	4.96

Tablica 10 – proračun prve faze porinuća – jednadžba bilance energija - Uršić

$\vartheta$  - kut nagiba vlake

Izračunavamo pomoću izraza (2.8)

Kut vlake se mijenja sa svakim novim korakom, zato je potrebno odrediti koliko on iznosi u svakom pojedinom koraku

$\mu$  - faktor trenja

se mijenja linearno od 0.020 do 0.030

$g$  - gravitacijska konstanta [ $m/s^2$ ]

$b$  - ubrzanje na kraju svakog koraka

$$b = g \cdot (\sin(\nu) - \mu \cdot \cos(\nu)) \quad [m/s^2]$$

ubrzanje očito nije konstantno. Zato ga je potrebno računati za više koraka koji prate prvu fazu. korake podjelimo po putu na jednake djelove

$x'$  - veličina koraka [m]

$v_1$  - brzina broda na početku svakog koraka

$v_2$  - brzina broda na kraju svakog koraka

računamo pomoću jednadžbe (2.35)

### 2.5.2 DRUGA FAZA

U drugoj fazi koristi se jednadžba (2.34). Interval  $x'$  se uzima kao kružni isječak kuta  $\varepsilon$  zbog zakrivljenosti navoza

$$v_2^2 = \frac{D - U \cdot x' \cdot \sin \vartheta + 2 \cdot \mu \cdot (D - U) \cdot x' \cdot \cos \vartheta + v_1^2 \left( \frac{D}{g \cdot x'} - k \right)}{\left( \frac{D}{g \cdot x'} + k \right)} \quad [m/s^2]$$

## 2.5.3 TREĆA FAZA

U trećoj fazi porinuća koriste se iste jednadžbe kao i u drugoj fazi porinuća

## - PRORAČUN DRUGE I TREĆE FAZE PORINUĆA

$\beta+\epsilon$ °	$\mu$	D t	U1 t	U2 t	U=U1+U2 t	$\beta+\epsilon$ rad	K	g m/s <sup>2</sup>	x' m	v1 m/s	v2 m/s
3.86	0.03	15250	36.95		36.95	0.0673	0	9.81	10	4.84	4.96
4.01	0.03	15250	103.77		103.77	0.0699	0.0208	9.81	10	4.96	5.69
4.15	0.03	15250	195.16	6.21	201.37	0.0725	0.0403	9.81	10	5.69	6.37
4.3	0.03	15250	257.24	61.35	318.59	0.075	0.0637	9.81	10	6.37	7.01
4.45	0.03	15250	325.49	300.1	625.59	0.0776	0.1251	9.81	10	7.01	7.62
4.59	0.03	15250	372.55	695.74	1068.29	0.0801	0.2137	9.81	10	7.62	8.19
4.74	0.03	15250	417.95	1410.03	1827.98	0.0827	0.3656	9.81	10	8.19	8.71
4.89	0.03	15250	464.67	2702.54	3167.21	0.0853	0.6334	9.81	10	8.71	9.15
5.03	0.03	15250	502.3	4334.74	4837.04	0.0878	0.9674	9.81	10	9.15	9.51
5.18	0.03	15250	540.45	6717.92	7258.37	0.0904	1.4517	9.81	10	9.51	9.74
5.33	0.03	15250	577.46	10029.7	10607.16	0.093	2.1214	9.81	10	9.74	9.8
5.48	0.03	15250	614.37	14164.2	14778.57	0.0955	2.9557	9.81	10	9.8	9.64
5.62	0.03	15250	14259.8	634.13	14893.93	0.0981	2.9788	9.81	10	9.64	9.47
5.77	0.03	15250	14015.8	658.98	14674.78	0.1006	2.935	9.81	10	9.47	9.32
5.92	0.03	15250	13992.6	692.97	14685.57	0.1032	2.9371	9.81	10	9.32	9.17
6.06	0.03	15250	13889.3	737.47	14626.77	0.1058	2.9254	9.81	10	9.17	9.04
6.21	0.03	15250	14034.5	786.56	14821.06	0.1083	2.9642	9.81	10	9.04	8.89

Tablica 11 – proračun druge i treće faze porinuća – jednadžba bilance energija - Uršić

$x$  - prijeđeni put broda po određenim koracima [m]

$D$  - težina broda [t]

$g$  - gravitacijska konstanta [m/s<sup>2</sup>]

$U_1$  - Istisnina saonica [t]

$U_2$  - Istisnina saonica [t]

$U$  - ukupna istinina [t]

$\vartheta$  - kut nagiba vlake

Računamo pomoću jednadžbe (2.8)

Kut vlake se mijenja sa svakim novim korakom, zato je potrebno odrediti koliko on iznosi u svakom pojedinom koraku. posebnu pozornost treba obratiti u trećoj fazi gdje se brod još i zakreće

$\mu$  - faktor trenja

je konstanta - 0.030

$k$  – koeficijent otpora

$$k = 0.0002 \cdot U \cdot v^2$$

$x'$  - veličina koraka [m]

$v_1$  - brzina broda na početku svakog koraka [m/s]

$v_2$  - brzina broda na kraju svakog koraka [m/s]

Računamo po formuli (2.34)



### 2.5.4 ČETVRTA FAZA

U četvrtoj fazi porinuća nastalu kinetičku energiju mora poništiti otpor vode. Jednadžba bilance energije u toj fazi glasi dakle:

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{D}{g} (v_2^2 - v_1^2) = -W \cdot x' \quad (2.36)$$

Proračunata brzina  $v_1$  nam je poznata kao brzina na kraju treće faze porinuća, a za otpor vode  $W$  postavimo kvadratni zakon:

$$W = k \cdot \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \quad [t] \quad (2.37)$$

Nalazimo brzinu  $v_2$  u četvrtoj fazi porinuća na kraju intervala duljine  $x'$  po formuli:

$$v_2^2 = \frac{v_1^2 \left( \frac{D}{g \cdot x'} - k \right)}{\left( \frac{D}{g \cdot x'} + k \right)} \quad [m/s^2] \quad (2.38)$$

Ako upotrijebimo za vrijeme otplova sredstva za zaustavljane broda (sidra, lance, betonske trupce itd.), onda moramo jednadžbu energije pisati u nešto izmijenjenom obliku. Za vrijeme djelovanja sredstava za kočenje jedan dio kinetičke energije broda prenaša se na sredstva za kočenje, a jedan dio ukupne energije troši se na svladavanje trenja sredstava za kočenje smorskim dnom i otpora vode.

Jednadžba bilance energije glasi:

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{D}{g} \cdot (v_2^2 - v_1^2) + \frac{1}{2} \cdot \frac{G_1}{g} v_2^2 = \mu \cdot G_1 \cdot x' - W \cdot x' \quad (2.39)$$

ako s  $G_1$  označimo težinu prvo upotrebljenih sredstava za kočenje na putu  $x'_1$ , a s  $\mu_g$  njihov koeficijent trenja.

iz ove jednadžbe nalazimo formulu za brzinu broda  $v_2$  na kraju odabranog intervala za vrijeme slobodnog otplova, kod upotrebe sredstava kočenje:

$$v_2^2 = \frac{v_1^2 \left( \frac{D}{g \cdot x'} - k \right) - 2\mu G_1 x'}{\left( \frac{D+G}{g \cdot x'} + k \right)} \quad [m/s^2] \quad (2.40)$$

## - PRORAČUN ČETVIRTE FAZE PORINUĆA

x	D	K	g	x'	v1	v2
m	t		m/s <sup>2</sup>	m	m/s	m/s
0	14720	3	9.81	10	8.99	8.99
25	14720	3	9.81	10	8.99	8.9
50	14720	3	9.81	10	8.9	8.81
75	14720	3	9.81	10	8.81	8.72
100	14720	3	9.81	10	8.72	8.64
125	14720	3	9.81	10	8.64	8.55
150	14720	3	9.81	10	8.55	8.47
175	14720	3	9.81	10	8.47	8.38
200	14720	3	9.81	10	8.38	8.3
225	14720	3	9.81	10	8.3	8.21
250	14720	3	9.81	10	8.21	8.13
275	14720	3	9.81	10	8.13	8.05
300	14720	3	9.81	10	8.05	7.97
325	14720	3	9.81	10	7.97	7.89
350	14720	3	9.81	10	7.89	7.81
375	14720	3	9.81	10	7.81	7.73
400	14720	3	9.81	10	7.73	7.66
425	14720	3	9.81	10	7.66	7.58
450	14720	3	9.81	10	7.58	7.5
475	14720	3	9.81	10	7.5	7.43
500	14720	3	9.81	10	7.43	7.35
525	14720	3	9.81	10	7.35	7.28
550	14720	3	9.81	10	7.28	7.21
575	14720	3	9.81	10	7.21	7.13
600	14720	3	9.81	10	7.13	7.06

Tablica 12– proračun četvrte faze porinuća – jednadžba bilance energija - Uršić

$x$  - prijeđeni put broda po odeđenim koracima [m]

$D$  - težina broda [t]

$g$  - gravitacijska konstanta [ $m/s^2$ ]

$k$  – koeficijent otpora broda

Računamo po frmuli (2.29)

$\mu_G$  - faktor trenja između morskog dna i utega

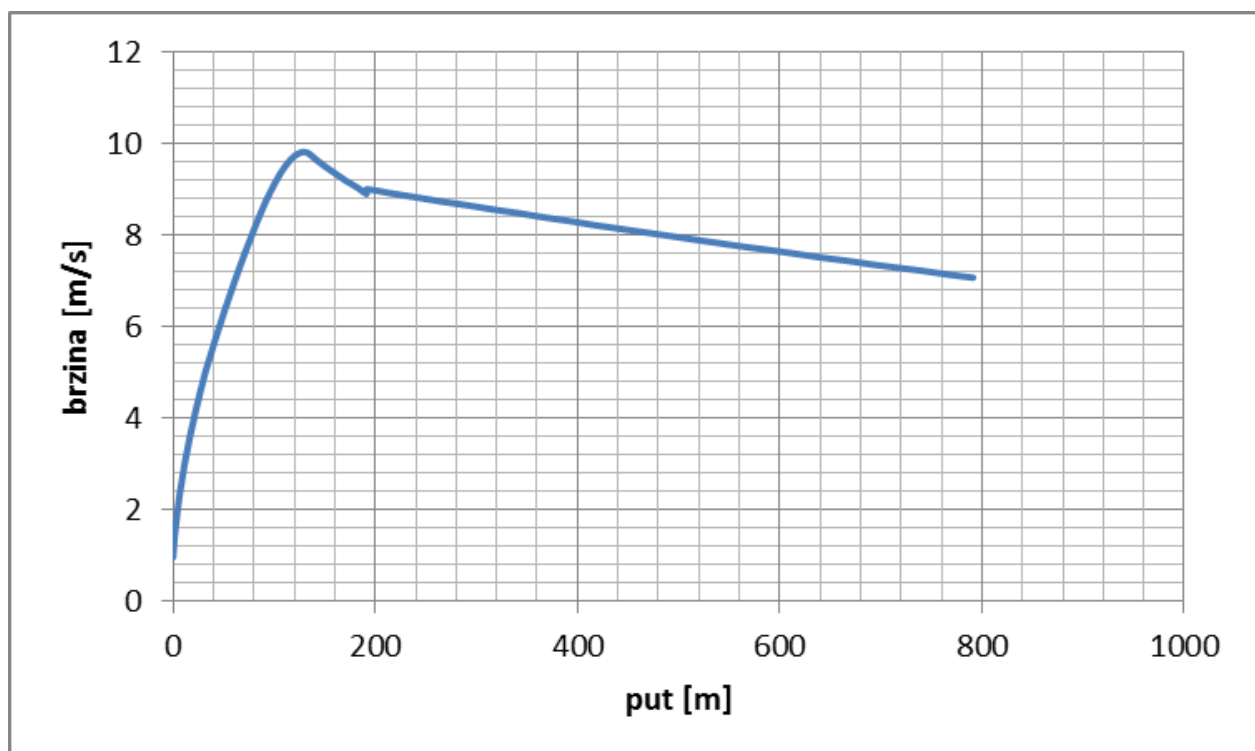
$G$  - težina utega [t]

$x'$  - veličina koraka [m]

$v_1$  - brzina broda na početku svakog koraka [m/s]

$v_2$  - brzina broda na kraju svakog koraka

Računamo po formuli (2.40)



Slika 22 – brzina gibanja broda po putu – jednadžba bilance energije - Uršić

Razlog ovakvih rezultata je zbog osjetljivosti formula na veličinu odabranog koraka i na veličinu koeficijenta otpora  $k$ . Sljedeći dijagram, napravljen u internetskoj aplikaciji *Wolfram Alpha*, prikazuje ovisnost izraza za brzinu broda u fazi otplova o ove dvije varijable

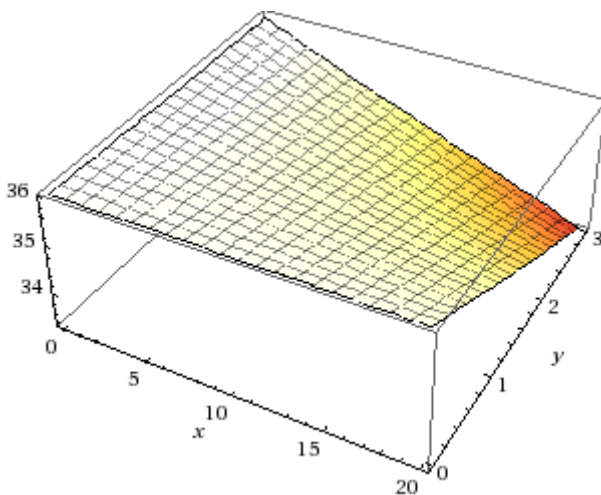
*Unos*

```
plot[(6^2*(15250/(9.81*x)-y))/(15250/(9.81*x)+y),{x,0,20},{y,0,3}]
```

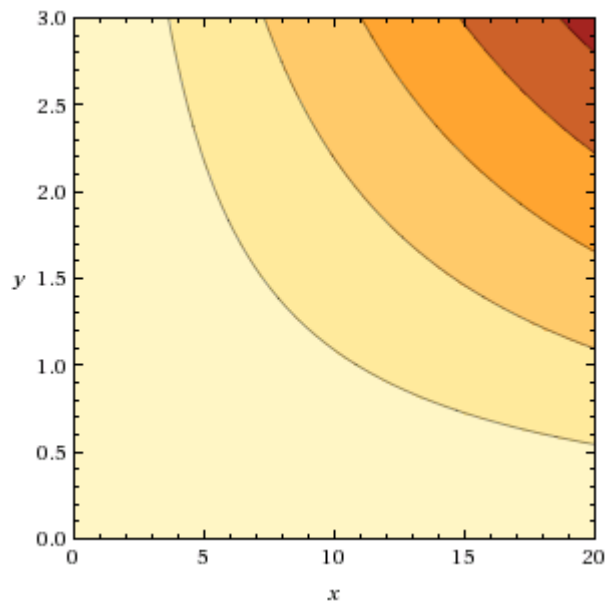
*Interpretacija*

plot	$\frac{6^2 \left( \frac{15250}{9.81x} - y \right)}{\frac{15250}{9.81x} + y}$	$x = 0 \text{ to } 20$
		$y = 0 \text{ to } 3$

*3D prikaz*



*2D prikaz*



Varijabla  $x$  predstavlja veličinu koraka, a  $y$  varijabla predstavlja koeficijent otpora. Dijagrami se mogu protumačiti na sljedeći način. Što uzmemo veći koeficijent otpora, to će veličina koraka imati veći utjecaj.

## 2.6 TREĆA METODA - Vladimir Semyonov-Tyan-Shansky

Obradit ćemo i metodu rješavanja proračuna porinuća broda diferencijalnom jednačbom gibanja prema teoriji prof. Semyonov-Tyan-Shansky

### 2.6.1 PRVA FAZA

Porinuće broda se može gledati kao pravocrtno gibanje. međutim nećemo tako promatrati ovaj slučaj zbog zakrivljenosti navoza. Zato ćemo kao i u prijašnjim metodama na svakom koraku mjenjati nagib navoza. Kad projiciramo sve sile u smjer ovog gibanja dobijemo sljedeću jednačbu:

$$\frac{D}{g}b + D \cdot \sin \vartheta - D \cdot \mu \cdot \cos \beta = 0 \quad (2.41)$$

daljnjim raspisivanjem uzimajući u obzir da je kut  $\vartheta$  i jako malen akcelaracija se može napisati na sljedeći način:

$$b = g(\vartheta - \mu) \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (2.42)$$

Iz ove jednačbe vidljivo je da se mora ispuniti sljedeći uvjet da bi se brod pokrenuo

$$\mu < \vartheta$$

Jednostavnom integracijom možemo dalje napisati izraze za brzinu i put

$$v = g(\vartheta - \mu)t + v_0 \text{ [m/s]} \quad (2.43)$$

$$x = g(\vartheta - \mu)\frac{t^2}{2} + v_0t + x_0 \text{ [m]} \quad (2.44)$$

$v_0$  Je početna brzina, a  $x_0$  je vrijednost inicijalnog puta, koji se uvijek može postaviti na nulu.

Ako se ne ispoštuje uvjet  $\mu < \vartheta$ , moguće je uvrstiti inicijalnu brzinu. Što se u stvarnosti radi sa hidrauličkim prešama.

Ako postavimo inicijalnu brzinu i put na 0, što je slučaj u pri ovom porinuću, možemo napisati sljedeću jednačbu za vrijeme:

$$t = \sqrt{2\frac{x}{g(\vartheta - \mu)}} \text{ [s]} \quad (2.45)$$

I sljedeću jednačbu za brzinu:

$$v = \sqrt{2g(\vartheta - \mu)x} \text{ [m/s]} \quad (2.46)$$

## - PRORAČUN PRVE FAZE PORINUĆA

$\beta+\varepsilon$ °	$\beta+\varepsilon$ rad	$\mu$	$g$ $m/s^2$	$b$ $m/s^2$	$x$ m	$v$
3.4	0.059311	0.025	9.81	0.336682	0	0
3.42	0.05966	0.025	9.81	0.340104	1.361713	0.962291
3.44	0.060009	0.025	9.81	0.343525	2.723427	1.367718
3.46	0.060358	0.025	9.81	0.346947	4.08514	1.683432
3.48	0.060707	0.025	9.81	0.350368	5.446854	1.953426
3.5	0.061056	0.025	9.81	0.35379	6.808567	2.194641
3.52	0.061404	0.025	9.81	0.357211	8.17028	2.415712
3.54	0.061753	0.025	9.81	0.360633	9.531994	2.621741
3.56	0.062102	0.025	9.81	0.364054	10.89371	2.81603
3.58	0.062451	0.025	9.81	0.367475	12.25542	3.000862
3.6	0.0628	0.025	9.81	0.370897	13.61713	3.177886
3.62	0.063149	0.025	9.81	0.374318	14.97885	3.348341
3.64	0.063498	0.025	9.81	0.377739	16.34056	3.513183
3.66	0.063847	0.025	9.81	0.38116	17.70227	3.673169
3.68	0.064196	0.025	9.81	0.384581	19.06399	3.828907
3.7	0.064544	0.025	9.81	0.388002	20.4257	3.980895
3.72	0.064893	0.025	9.81	0.391423	21.78741	4.129548
3.74	0.065242	0.025	9.81	0.394844	23.14913	4.275213
3.76	0.065591	0.025	9.81	0.398265	24.51084	4.418187
3.78	0.06594	0.025	9.81	0.401686	25.87255	4.558722
3.8	0.066289	0.025	9.81	0.405106	27.23427	4.697037
3.82	0.066638	0.025	9.81	0.408527	28.59598	4.833323
3.84	0.066987	0.025	9.81	0.411948	29.95769	4.967746
3.86	0.067336	0.025	9.81	0.415369	31.31941	5.100455

Tablica 13 – proračun prve faze porinuća – diferencijalna jednačba - Shansky

$\vartheta$  - kut nagiba vlake

računamo prema formuli (2.7)

Kut vlake se mijenja sa svakim novim korakom, zato je potrebno odrediti koliko on iznosi u svakom pojedinom koraku

$\mu$  - faktor trenja

se mijenja linearno od 0.020 do 0.030

$g$  - gravitacijska konstanta [ $m/s^2$ ]

$b$  - ubrzanje na kraju svakog koraka

računamo prema formuli (2.42)

ubrzanje očito nije konstantno. Zato ga je potrebno računati za više koraka koji prate prvu fazu. korake podjelimo po putu na jednake djelove

$x$  - prijeđeni put broda po odedenim koracima [m]

računamo prema formuli (2.44)

$v$  - brzina broda na kraju svakog koraka

računamo prema formuli (2.46)

$t$  - vrijeme potrebno da brod prijeđe zadani put

računamo prema formuli (2.45)



### 2.6.2 DRUGA FAZA

Tijekom druge faze važno je razmotriti hoće li tijekom porinuća doći do *zakretanja*. Najlakši način da se to ustvrdi jest da se napravi zbroj momenata oko praga navoza. Odnosno kada moment težine broda oko praga pređe moment uzgona broda oko praga navoza. Ovo je moguće samo kad težište masa pređe prag .

Moment otpora vode možemo zanemariti s obzirom da je zanemariv u usporedbi sa momentom uzgona. Isto tako je dopušteno da se ignoriraju momenti nastali od drugih sila koje djeluju na brod tijekom druge faze porinuća. Djelovanje tih sila je gotovo horizontalno na kretanje broda

U ovoj fazi mogu se zanemariti svi momenti uzgona, jer su njihove veličine zanemarive u odnosu na smjer u kojem se giba brod.

Kad projiciramo sve sile u smjeru gibanja dobijemo sljedeću diferencijalnu jednadžbu:

$$\frac{D}{g}b + N \cdot \sin \vartheta - N \cdot \mu \cdot \cos \beta - W = 0 \quad (2.47)$$

gdje je  $N$  definiran kao

$$N = D - \gamma U \quad (2.48)$$

Daljnijim izvodom dobijemo izraz za brzinu

$$v = \sqrt{e^{-n_l} \left[ \frac{2}{3} \cdot g \cdot (\vartheta - \mu) \cdot \left( 1 - \frac{N \cdot x^2 \cdot e^{n_l}}{D} \right) + v_0^2 \right]} \quad [m/s] \quad (2.49)$$

gdje je:

$$n_l = C_s \cdot \left( 1 - \frac{N}{D} \right)^{2/3} \cdot \frac{x_l}{\sqrt[3]{\frac{D}{\gamma}}} \quad (2.50)$$

## - PRORAČUN DRUGE FAZE PORINUĆA

x	D	g	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	U=U <sub>1</sub> +U <sub>2</sub>	β+ε	β+ε	μ	N	C <sub>s</sub>	gama	nl	v	v
m	t	m/s <sup>2</sup>	t	t	t	°	rad						8.31	8.31
0.00	15250.00	9.81	36.95		36.95	3.86	0.07	0.03	15213.05	0.32	9.81	0.00	8.31	8.35
10.00	15250.00	9.81	103.77		103.77	4.01	0.07	0.03	15146.23	0.32	9.81	0.00	8.34	8.38
20.00	15250.00	9.81	195.16	6.21	201.37	4.15	0.07	0.03	15048.63	0.32	9.81	0.01	8.37	8.40
30.00	15250.00	9.81	257.24	61.35	318.59	4.30	0.08	0.03	14931.41	0.32	9.81	0.01	8.38	8.42
40.00	15250.00	9.81	325.49	300.10	625.59	4.45	0.08	0.03	14624.41	0.32	9.81	0.02	8.37	8.41
50.00	15250.00	9.81	372.55	695.74	1068.29	4.59	0.08	0.03	14181.71	0.32	9.81	0.02	8.33	8.37
60.00	15250.00	9.81	417.95	1410.03	1827.98	4.74	0.08	0.03	13422.03	0.32	9.81	0.03	8.26	8.30
70.00	15250.00	9.81	464.67	2702.54	3167.21	4.89	0.09	0.03	12082.79	0.32	9.81	0.05	8.12	8.16
80.00	15250.00	9.81	502.30	4334.74	4837.04	5.03	0.09	0.03	10412.96	0.32	9.81	0.06	7.92	7.97
90.00	15250.00	9.81	540.45	6717.92	7258.37	5.18	0.09	0.03	7991.63	0.32	9.81	0.08	7.65	7.71
100.00	15250.00	9.81	577.46	10029.70	10607.16	5.33	0.09	0.03	4642.84	0.32	9.81	0.11	7.28	7.37
110.00	15250.00	9.81	603.75	11761.10	12364.85	5.48	0.10	0.03	2885.15	0.32	9.81	0.12	6.90	7.00

Tablica 14 – proračun druge faze porinuća – diferencijalna jednadžba - Shansky

$x$  - prijeđeni put broda po odedenim koracima [m]

$D$  - težina broda [t]

$g$  - gravitacijska konstanta [m/s<sup>2</sup>]

$U_1$  - Istisnina saonica [t]

$U_2$  - Istisnina saonica [t]

$v$  - kut nagiba vlake

se računa po formuli (2.7)

Kut vlake se mjenja sa svakim novim korakom, zato je potrebno odrediti koliko on iznosi u svakom pojedinom koraku.

$\mu$  - faktor trenja

je konstanta - 0.030

$N$  - razlika težine i istisnine u određenom koraku

Računa se prema formuli (2.48)

$C_s$  - Bezdimenzionalni koeficijent koji uglavnom ovisi o formi broda i potopljenim djelovima broda. Tako da ga je potrebno odrediti ekperimentalno

Preporučena veličina  $C_s$  iznosi 0.35

$n_l$  - Dio raspisanog integrala diferencijalne jednadžbe

Računa se prema formuli (2.50)

$x'$  - veličina koraka

$v$  - brzina broda na kraju svakog koraka

Računa se prema formuli (2.49)

## 2.6.3 TREĆA FAZA

Razmatranju trećeg perioda porinuća je vrlo važno odrediti njegov početak, da bi saznali kada se krma počinje dizati. Krma se počinje dizati tada kada je suma svih momenata i svih sila koji djeluju oko koljevke spuštavanja jednaki nuli

1. Projekcija svih sila u smjeru gibanja broda

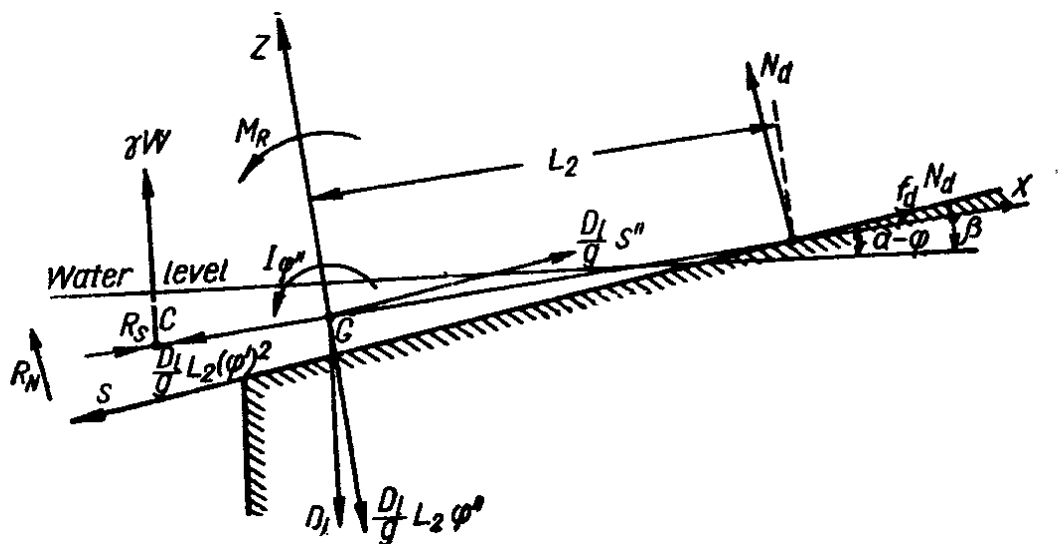
$$\frac{-D}{g}b + \frac{D}{g}L_2 \cdot \varphi'^2 + \frac{D}{g}L_2(\varphi + \vartheta + \alpha)\varphi'' + D\beta - \gamma U\beta - R_s - \mu N = 0 \quad (2.51)$$

2. Projekcija svih sila okomito na smjer gibanja broda

$$N_d - D + \gamma U + \frac{D}{g}L_2 \cdot \varphi'' + \frac{D}{g}L_2(\varphi + \vartheta + \alpha)\varphi'^2 + R_N = 0 \quad (2.52)$$

3. Suma svih momenata oko koljevke

$$-I_y \cdot \varphi'' + R_N + \frac{D}{g}L_2(\varphi + \vartheta + \alpha) \cdot b + \frac{D}{g}L_2^2 \cdot \varphi'' - DL_2 + \gamma U(L_2 - x) - M_R = 0 \quad (2.53)$$



Slika 23 – prikaz svih sila koje djeluju na brod u trećoj fazi porinuća – [2] *Statics and Dynamics of the ship - Vladimir Semyonov-Tyan-Shansky*

Daljnijim izvodom dobijemo izraz za brzinu

$$v = \sqrt{e^{-n_l} \left[ 2 \cdot g \cdot (\vartheta - \mu) \frac{N}{D} \left( 1 - \frac{x}{2x_3} \right) + v_0^2 \right]} \quad [m/s] \quad (2.54)$$

gdje je:

$$n_l = C_s \cdot \left( 1 - \frac{N}{D} \right)^{2/3} \cdot \frac{x}{\sqrt[3]{\frac{D}{\gamma}}} \quad (2.55)$$

gdje je N definiran kao

$$N = D - \gamma U \quad (2.56)$$

#### - PRORAČUN TREĆE FAZE PORINUĆA

x	D	g	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	U=U <sub>1</sub> +U <sub>2</sub>	β+ε	β+ε	μ	N	C <sub>s</sub>	gama	n <sub>l</sub>	v
m	t	m/s <sup>2</sup>	t	t	t	°	rad						6.98
0.00	15250.00	9.81	603.75	11761.10	12364.85	5.48	0.10	0.03	2885.15	0.10	9.81	0.00	6.98
10.00	15250.00	9.81	624.94	12195.40	12820.34	5.62	0.10	0.03	2429.66	0.10	9.81	0.08	6.86
20.00	15250.00	9.81	652.31	12526.40	13178.71	5.77	0.10	0.03	2071.29	0.10	9.81	0.16	6.55
30.00	15250.00	9.81	687.85	12838.20	13526.05	5.92	0.10	0.03	1723.95	0.10	9.81	0.24	6.06
40.00	15250.00	9.81	734.53	13226.20	13960.73	6.06	0.11	0.03	1289.27	0.10	9.81	0.33	5.37
50.00	15250.00	9.81	785.79	13750.90	14536.69	6.21	0.11	0.03	713.32	0.10	9.81	0.42	4.50

Tablica 15 – proračun treće faze porinuća – diferencijalna jednadžba - Shansky

x - prijeđeni put broda po odedenim koracima [m]

D - težina broda [t]

g - gravitacijska konstanta [m/s<sup>2</sup>]

U<sub>1</sub> - Istisnina saonica [t]

U<sub>2</sub> - Istisnina saonica [t]

U - ukupna istinina [t]

v - kut nagiba vlake

ϑ = β + ε [rad]

Kut vlake se mijenja sa svakim novim korakom, zato je potrebno odrediti koliko on iznosi u svakom pojedinom koraku.

$\mu$  - faktor trenja

je konstanta - 0.030

$N$  - razlika težine i istisnine u određenom koraku

Računa se po formuli (2.56)

$C_s$  - Bezdimezionalni koeficijent

Preporučena veličina  $C_s$  iznosi 0.35

$n_l$  - Dio raspisani integral diferencijalne jednadžbe

Računa se prema formuli (2.55)

$x$  - veličina koraka [ $m$ ]

$v$  - brzina broda na kraju svakog koraka

Računa se prema formuli (2.54)

$x_3$  - udaljenost koju brod provede u trećoj fazi [ $m$ ]

#### 2.6.4 ČETVRTA FAZA

Tjekom četvrtog perioda brod se giba po inerciji, a jednadžbu gibanja možemo napisati:

$$-R - \frac{D}{g}b \quad (2.57)$$

A izraz za otpor se može napisati:

$$R = k_s \frac{D}{g}b + \frac{\rho}{2} C_s \nabla^{2/3} v^2 \quad (2.58)$$

Za brzinu možemo napisati:

$$v = v_0 \cdot e^{-Px} \quad [m/s] \quad (2.59)$$

gdje je:

$$P = \frac{C_s}{2(1+k_s)} + \frac{1}{\sqrt[3]{\Delta}} \quad (2.60)$$

## - PRORAČUN ČETVIRTE FAZE PORINUĆA

x	Vd	g	x'	v1	Cs	P	v2
m	m <sup>3</sup>	m/s <sup>2</sup>	m	m/s			m/s
0.00	15250.00	9.81	1.30	4.57	0.12	0.011475	0.12
10.00	15250.00	9.81	1.30	0.12	0.12	0.011475	0.11
20.00	15250.00	9.81	1.30	0.11	0.12	0.011475	0.10
30.00	15250.00	9.81	1.30	0.10	0.12	0.011475	0.09
40.00	15250.00	9.81	1.30	0.09	0.12	0.011475	0.08
50.00	15250.00	9.81	1.30	0.08	0.12	0.011475	0.07
60.00	15250.00	9.81	1.30	0.07	0.12	0.011475	0.06
70.00	15250.00	9.81	1.30	0.06	0.12	0.011475	0.05
80.00	15250.00	9.81	1.30	0.05	0.12	0.011475	0.05
90.00	15250.00	9.81	1.30	0.05	0.12	0.011475	0.04
100.00	15250.00	9.81	1.30	0.04	0.12	0.011475	0.04
110.00	15250.00	9.81	1.30	0.04	0.12	0.011475	0.03
120.00	15250.00	9.81	1.30	0.03	0.12	0.011475	0.03
130.00	15250.00	9.81	1.30	0.03	0.12	0.011475	0.03
140.00	15250.00	9.81	1.30	0.03	0.12	0.011475	0.02
150.00	15250.00	9.81	1.30	0.02	0.12	0.011475	0.02
160.00	15250.00	9.81	1.30	0.02	0.12	0.011475	0.02
170.00	15250.00	9.81	1.30	0.02	0.12	0.011475	0.02
180.00	15250.00	9.81	1.30	0.02	0.12	0.011475	0.02
190.00	15250.00	9.81	1.30	0.02	0.12	0.011475	0.01
200.00	15250.00	9.81	1.30	0.01	0.12	0.011475	0.01
210.00	15250.00	9.81	1.30	0.01	0.12	0.011475	0.01
220.00	15250.00	9.81	1.30	0.01	0.12	0.011475	0.01
230.00	15250.00	9.81	1.30	0.01	0.12	0.011475	0.01
240.00	15250.00	9.81	1.30	0.01	0.12	0.011475	0.01

Tablica 16 – proračun treće faze porinuća – diferencijalna jednačba - Shansky

$x$  - prijeđeni put broda po odeđenim koracima [m]

$\Delta$  - istisnina broda [m<sup>3</sup>]

$g$  - gravitacijska konstanta [m/s<sup>2</sup>]

$C_s$  – Bezdimezionalni koeficijent

Preporučena veličina  $C_s$  za četvrtu fazu porinuća iznosi 0.12

$P$  - Dio raspisanog integrala diferencijalne jednačbe



Računa se prema formuli (2.60)

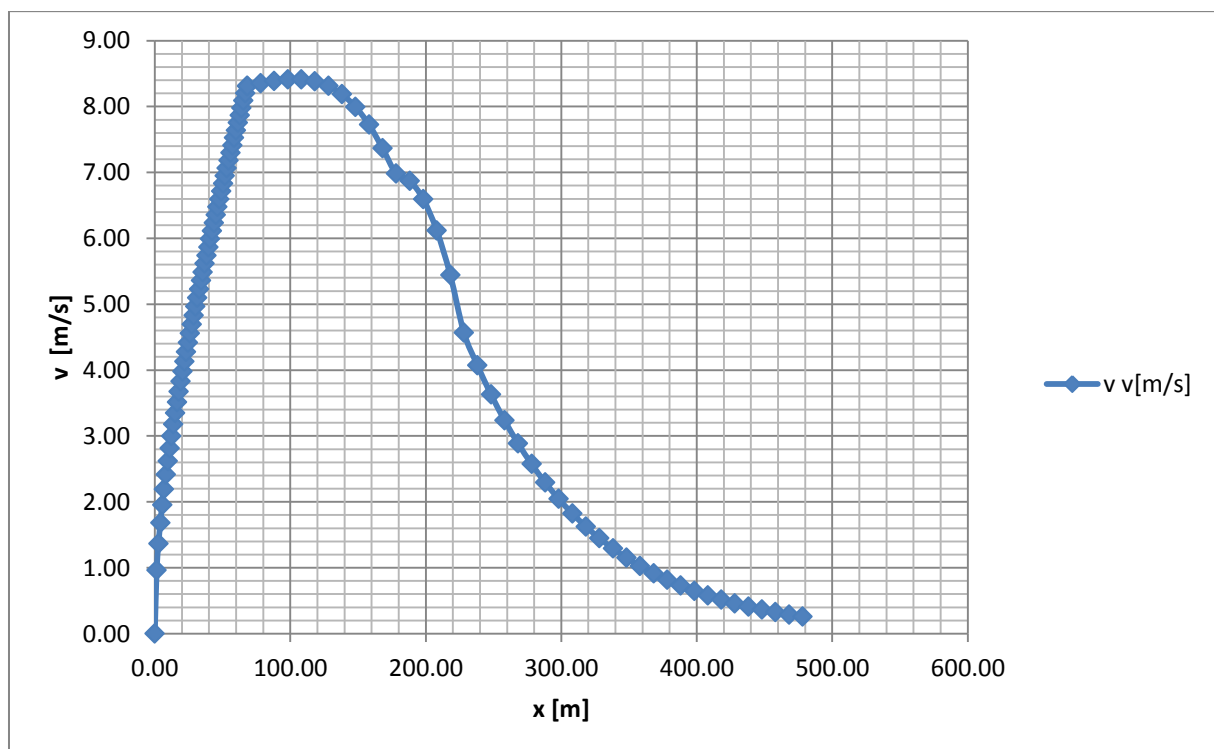
$$1 + k_s = 1.05 \quad (2.61)$$

$x'$  - veličina koraka [m]

$v$  - brzina broda na kraju svakog koraka

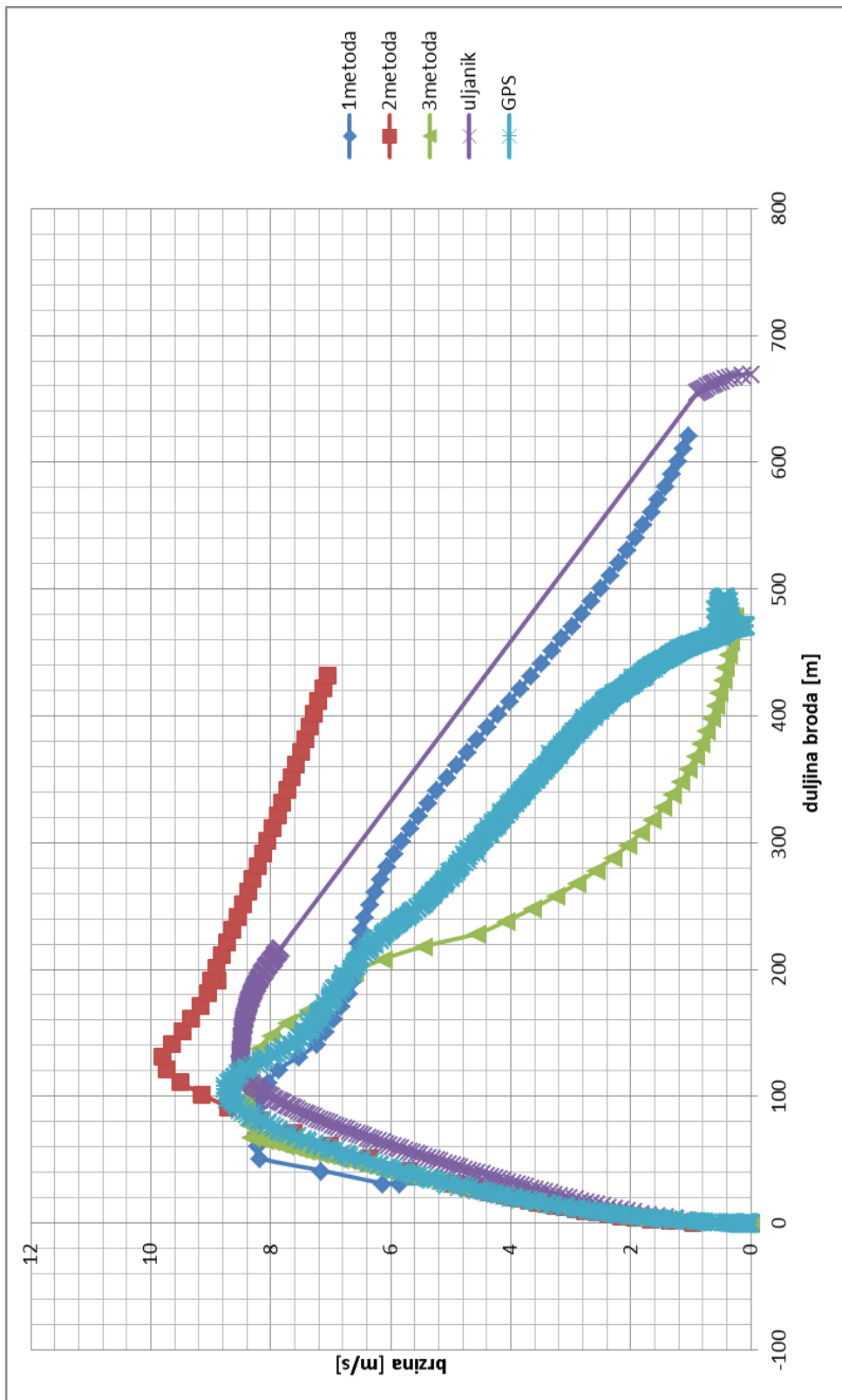
Računa se prema formuli (2.59)

$v_o$  - brzina broda na početku svakog koraka



Slika 24 – dijagram brzine po putu

## 2.7 USPOREDBA REZULTATA



Slika 25 – usporedba rezultata

## 3 PRORAČUN U RAČUNALNOM PROGRAMU LS-DYNA

### 3.1 PRIPREMA MODELA ZA PRORAČUN U RAČUNALNOM PROGRAMU LS-DYNA

Pri izradi tabličnog modela opruga uzgona za LS-dynau su, ulazni podaci bili numerički prikazane krivulje novogradnje 483 borodgradilišta Uljanik d.d. Treba navesti i veliku pomoć kolege Tomislava Dundjera, koji je sudjelovao pri izradi ovog modela.

Pri izradi su se koristili sljedeći programski alati : **FreeShip, Rhinoceros, Maxsurf, Nastran.**

Faze izrade su bile sljedeće :

1. Priprema podataka i učitavanje u Freeship
2. Rhinoceros
3. Maxsurf – Hydromax
4. Obrada podataka za unos u Nastran
5. Nastran

#### 1. Priprema podataka i učitavanje u Freeship

Freeship je programski alat koji se koristi za modeliranje forme broskog trupa.

Freeship nudi opciju modeliranja oplate preko učitane txt datoteke koji se sastoji od krivulja rebara ( chines ).

Postupak je sljedeći :

- 1) Sređivanje numeričkih podataka dobivenih od Uljanik d.d. u oblik koji opisuje krivulje rebara preko x,y,z koordinata. Teoretski je moguće uzeti neograničen broj rebara, ali se zbog brzine rada u softwareskim alatima preporučuje se manji broj rebara ( 20– 30).

- 2) Pri sređivanju podataka se **ne unose** koordinate rebara koje opisuje bulb broda. Razlog leži u ograničenosti CAD alata. Zbog toga se kasnije izvodi međukorak u alatu Rhinocerosu.
- 3) Uređeni podaci se prebacuju u txt datoteku [ brod.txt ]
- 4) U Freeshipu se naredbama File/Import/Chines učitava datoteka.
- 5) Dobiveni model broda se provjera na moguće greške. Nakon toga se naredbama File/Export/IGES sprema u IGES datoteku ( standard koji omogućuje učitavanje u sve relevantne alate brodograđevne struke) [ npr. brod.iges ] .

## 2. Rhinoceros

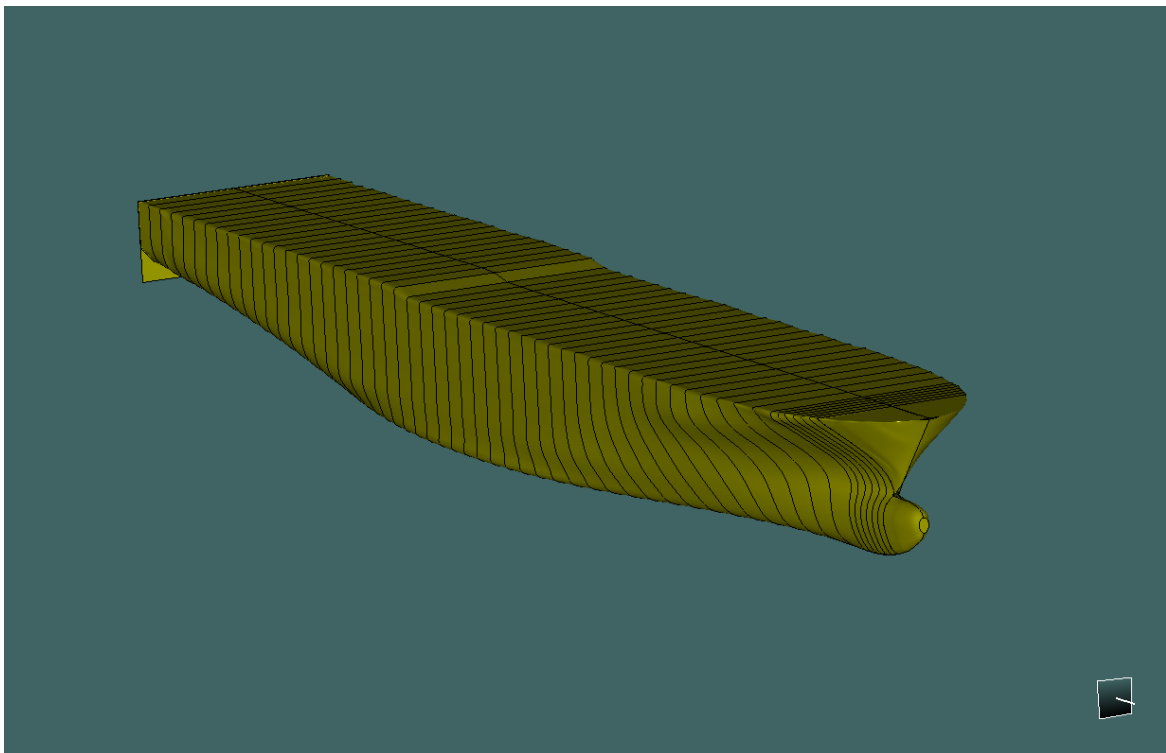
Korak u Rhinocerosu se koristi da bi se efikasno i uspješno dizajnirao bulb broda. Postupak ide slijedeće

- 1) U notepad se unesu 5-10 krivulja rebara koje opisuju bulb. Stanovita datoteka se sprema [ npr. bulb.txt ].
- 2) U Rhinu se učitava brod.iges datoteka. Datoteka se sprema u Rhinocerosov format [ brod.3dm ].
- 3) Učitava se brod.3dm. Pod opcijom file/import učitamo bulb.txt. Sada uz učitane forme broda imamo i točke rebara bulba.
- 4) Točke rebara opcijom **Curve through points** povežemo u krivulju ( opcija points object snap mora biti uključena ). Povezujemo samo krivulje pojedinog rebara. Krivulje ne vežemo međusobno.
- 5) Opcijom **Loft** sada vežemo zadnju površinu na modelu broda sa krivuljama bulba. Tako dobivamo gotovu formu. Gotovu formu ponovo spremamo u .iges verziju [ brod2.iges ].
- 6) File brod2.iges prvo učitamo u Maxsurf te spremamo u brod2.msd verziju, te naknadno učitavamo u Hydromax te spremamo u brod2.hdm verziju. Ukoliko je došlo do greške forma se neće moći učitati u Hydromaxu. Nadalje može se točnost

modeliranja provjeriti opcijom **Upright hydrostatics** u Hydromaxu, gdje se očita istisnina na projektnom gasu. Ukoliko je u tolerantnom području, model je uredi.

Ovime je modeliranje forme broda završeno. Sav daljnji rad je usmjeren na analizu podataka u Hydromaxu.

### 3. Maxsurf – Hydromax



*Slika 26 – prikaz broda u hydromax-u*

U podacima dostavljenima od Uljanika d.d se mogao očitati trim lakog broda ( tj. gaz broda na krmi i pramcu) , masa lakog broda te razmještaj masa na brodu ( sa pripadajućim koordinatama težišta masa ).

Da bi simulirali trim broda bilo je potrebno u Hydromaxu napraviti **Loadcase** sa pripadajućim masama. Unošenjem masa lakog broda sa korespondirajućim težištima iz podataka dostavljenima od Uljanika d.d. nije bilo moguće dobiti zadovoljavajući trim broda.

S toga je bio potreban iterativan postupak koji je sadržavao korekciju pojedinih masa i njihovih težišta. Postupak je bio sljedeći:

- 1) Napravio bi se loadcase
- 2) Odabrali bi se analiza **Equilibrium**. Pokrenula bi se analiza. Pod Window/Results bi očitali gaz na krmi ( Draft at AP ) i pramcu ( Draft at FP ).
- 3) Ukoliko trim stanovitog loadcasa ne zadovoljava korigirati mase i njihovo težište te iterirati.
- 4) Ukoliko trim zadovoljava, pod Window/Graph se dobiva areala rebara broda ovisna o duljini broda. Time smo dobili arealu rebara oko duljine broda za laki brod.

Ukoliko trim broda zadovoljava ulazi se u analizu hidrostatičke. Za dobivanje kasnijih podataka iz programa Hydromax smo uzimali podatke za arealu rebara ovisno o duljini broda.

Očitavali smo arealu rebara za gaz od : 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14 i 15 metara, projektni gaz  $T=9,4$  m, te već ranije dobivenu arealu rebara za laki brod.

Postupak je bio sljedeći :

- 1) Odabrali smo analizu **Upright Hydrostatics**
- 2) Pod Analysis/Draft odredili bi smo početnu i krajnu vrijednost gaza do koje će se analiza vršiti te broj podjela drafta pri analizi ( što veći broj podjela to preciznija analiza, preporučuje se minimalno 10 podijela).
- 3) Pokrenula bi se ( Analysis/Start Hydrostatics ).
- 4) Pod Window/Graph smo dobili grafove za više hidrostatičkih podataka.
- 5) U tom grafičkom modu, odabrali bi smo analizu **Equilibrium**. Time smo dobili arealu rebara po duljini broda za određeni gaz.
- 6) Duplim klikom na krivulju areale dobivamo podatke o grafu. Ti se podaci kopiraju ( u našem slučaju u Excell ), te se tamo radi novi graf. To nam omogućuje manipulaciju podataka areale rebara.



*Slika 27 – dijagram rasporeda masa*

Displacement tonne	39800
Heel to Starboard degrees	0
Draft at FP m	9.4
Draft at AP m	9.4
Draft at LCF m	9.4
Trim (+ve by stern) m	0
WL Length m	200.945
WL Beam m	32.366
Wetted Area m <sup>2</sup>	7579.903
Waterpl. Area m <sup>2</sup>	5168.823
Prismatic Coeff.	0.64
Block Coeff.	0.628
Midship Area Coeff.	0.985
Waterpl. Area Coeff.	0.795
LCB from zero pt. (+ve fwd) m	97.277
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	89.869
KB m	5.1
KG m	9.4
BMt m	9.843
BML m	309.433
Gmt m	5.544
GML m	305.134
KMt m	14.944
KML m	314.534
Immersion (TPc) tonne/cm	52.98
MTc tonne.m	617.096
RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1) tonn	3850.799
Max deck inclination deg	0
Trim angle (+ve by stern) deg	0

Tablica 17 – izlistak iz maxsurfa

#### 4. Obrada podataka za unos u Nastran

U programu Nastran smo odlučili sile uzgona zamijeniti silama u oprugama (koje predstavljaju sile uzgona) ovisne o gazu broda.

Pozicije opruga na brodu smo dobili očitavanjem s FEM modela koji nam je bio na raspolaganju.

Da bi dobili sile iz podataka o areama rebara morali smo izvršiti linearnu aproksimaciju te krivulje. To smo izvršili na sljedeći način.



Neka nam je  $x_{12}$  pozicija čvora za koji želimo znati silu, a  $x_{11}$  i  $x_{13}$  su čvorovi prije i poslije čvora  $x_{12}$ . Stoga je :

$$x_1, \dots, x_{11}, x_{12}, x_{13}, \dots, x_n$$

$$e = x_{12} - x_{11} \quad (3.1)$$

$$f = x_{13} - x_{12} \quad (3.2)$$

$$o_{12_L} = x_{12} - \frac{e}{2} \quad (3.3)$$

$$o_{12_D} = x_{12} + \frac{e}{2} \quad (3.4)$$

Za točku  $x_{12}$ , točke  $o_{12_L}$  i  $o_{12_D}$  predstavljaju točke za koje očitavamo površine na krivulji areala rebara.

S toga

$A(o_{12_L})$  i  $A(o_{12_D})$  [ $m^2$ ] očitane površine na krivulji areala rebara

$$b = \frac{e + f}{2} \quad [m] \text{ - razmak} \quad (3.5)$$

$$F = \frac{A(o_{12_L}) + A(o_{12_D})}{2} \times b \times \rho \times g \quad [N] \text{ - sila u opruzi na čvoru } x_{12} \quad (3.6)$$

$\rho$  [ $kg/m^3$ ] – gustoća vode

$g$  - gravitacijska konstanta [ $m/s^2$ ]

Postupak bi se ponovio za sve pozicije opruga ( čvorove) i za sve gazove. Vrijednosti površina areale rebara za pojedine točke su se očitavale ručno s grafa .

Ovdje treba naglasiti da kod proračuna podataka za laki brod postupak zahtijeva još dodatno pronalaženje podataka za gaz. Naime, sile u čvorovima bi se pronašle sukladno gore navedenom postupku, ali pošto brod ima trim, nisu poznati gazovi za pojedini čvorove. Taj se problem rješava na sljedeći način:

- 1) Za vrijednost koordinate duljne broda na krmenom piku ( u našem slučaju  $x=0\text{m}$ ) se očita gaz ( u našem slučaju  $T=7,059\text{ m}$ ). Isto se napravi i za pramčani pik. Te dvije točke se unesu u graf gaz-duljina broda. Između točaka se povuče pravac
- 2) Opcijom **Trendline** u programskom paketu Excell se dobije funkcija pravca  $T(x)$ .
- 3) Pomoću funkcije  $T(x)$  se onda za vrijednosti  $x$  koje korespondiraju s vrijednostima čvorova izračunaju gazovi

## 5. Nastran

U programu Nastran smo odlučili sile uzgona zamijeniti silama u oprugama ( koje predstavljaju sile uzgona) ovisne o gazu broda.

Pošto su nam sad poznate sile za svaku oprugu ( čvor ) za sve gazove, bilo je potrebno samo još povezati sve u Nastranu. Najpraktičniji način je preko tekstualnog unosa.

Postupak je sljedeći :

- 1) Definiiraju se čvorovi na brodu u kojem će biti smješteni počeci opruga. Prvo se zada ime čvora ( NID), pa  $x,y,z$  koordinate ( npr. čvor broj 9, sa koordinatama  $x= 23,465\text{ m}$ ,  $y= 0\text{ m}$ ,  $z= 0\text{ m} \implies 50009,23.365,0,0,2,3$  ).
- 2) Definiiraju se dna ( krajevi ) opruge . Postupak je isti kao i pod točkom 1) samo što se vrijednost  $z$ -koordinate mijenja ovisno koliko dugačku oprugu želimo. U našem slučaju, pošto smo računali gaz do  $T= 15\text{ m}$ , opruga je imala duljinu od 15 metara ( npr.  $50109,23.365,0,-15,7,7$  ).
- 3) Definiiraju se diskretni elementi. Prvo se unese ime diskretnog elementa (EID), pa ime opruge (PID), početni i krajni čvorovi elementa (  $N1$  i  $N2$  ), te njegove karakteristike ( VID, S, PF, OFFSET ) ( npr. Element  $EID=50009$  opisan oprugom  $PID=509$ , sa početnom točkom u čvoru  $N1=50009$  i krajnom točkom u čvoru  $N2=50109 \implies 50009,509,50009,50109,0,1,0,-9.4$  )
- 4) Definiiraju se opruge za svaki element. Opruge imaju za svaku svoju stlačenu duljinu različitu vrijednost sile. Stlačena duljina ima vrijednost gaza broda a vrijednost sile

opruge ima vrijednost uzgona za taj gaz, što smo proračunali u poglavlju 4. Primjer unosa opruge :

5)

\*DEFINE\_CURVE 509

-15 , -14312.91542

-14 , -12775.18123

-13 , -11160.57431

-12 , -9592.85673

-11 , -7979.961664

-10 , -6448.127061

-9 , -5061.276526

-8 , -3795.648015

-7 , -2913.619725

-6.309685 , -2474.131467

-6 , -2256.33781

-5 , -1735.379878

-4 , -1288.885167

-3 , -872.6437236

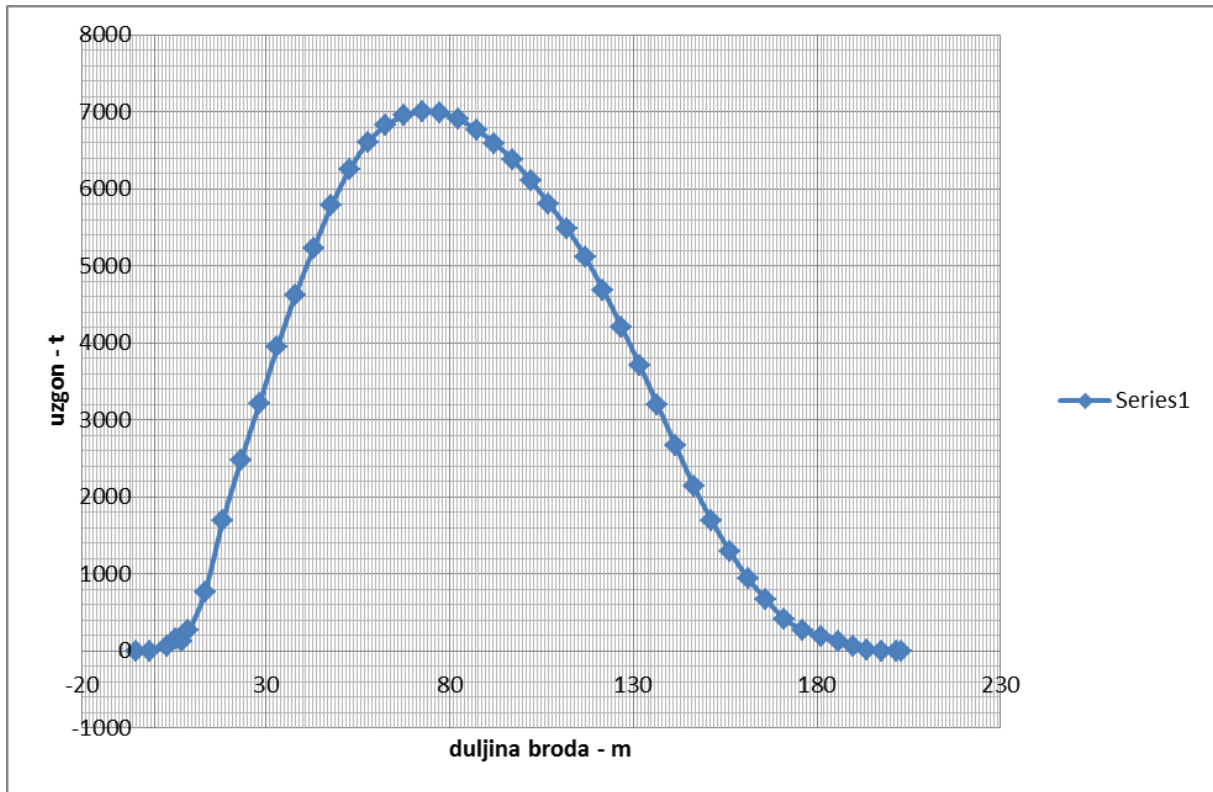
-2 , -499.2216084

-1 , -165.9648213

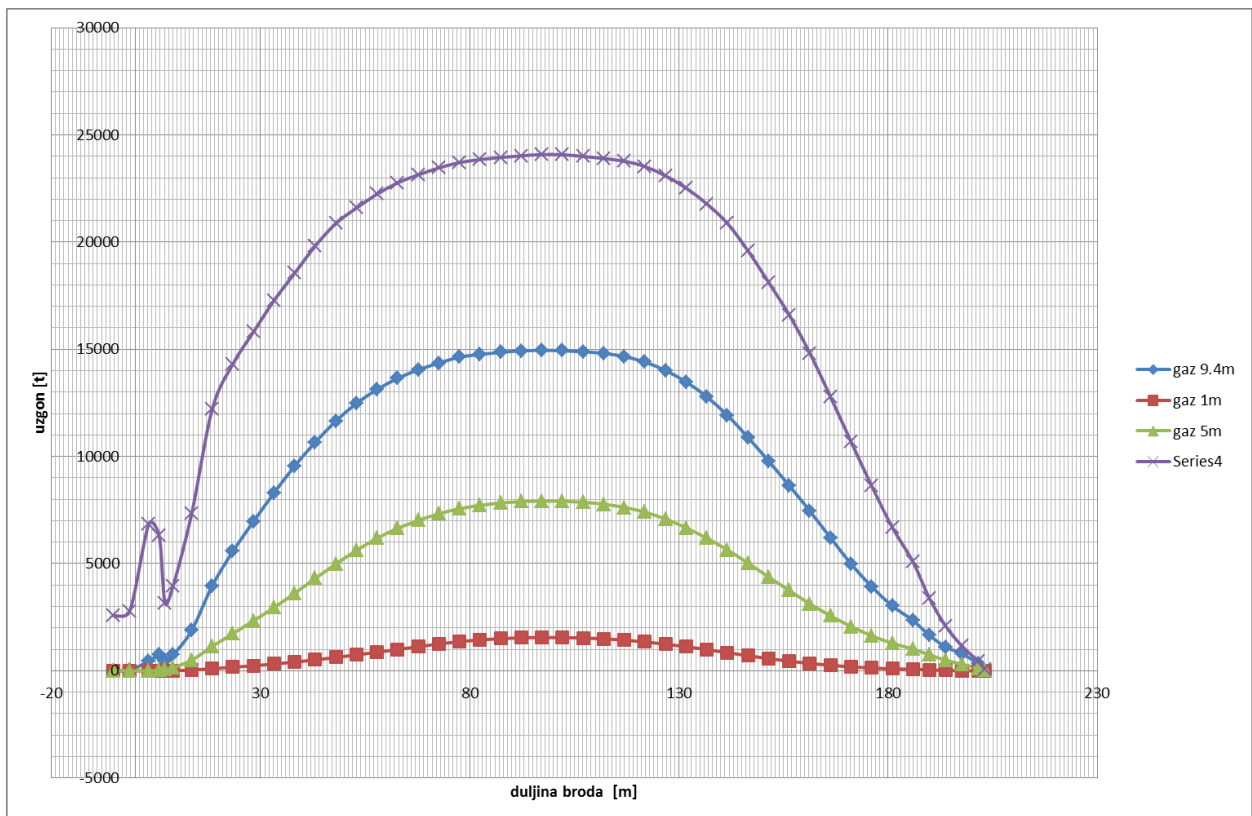
0 , 0

10 , 0.1

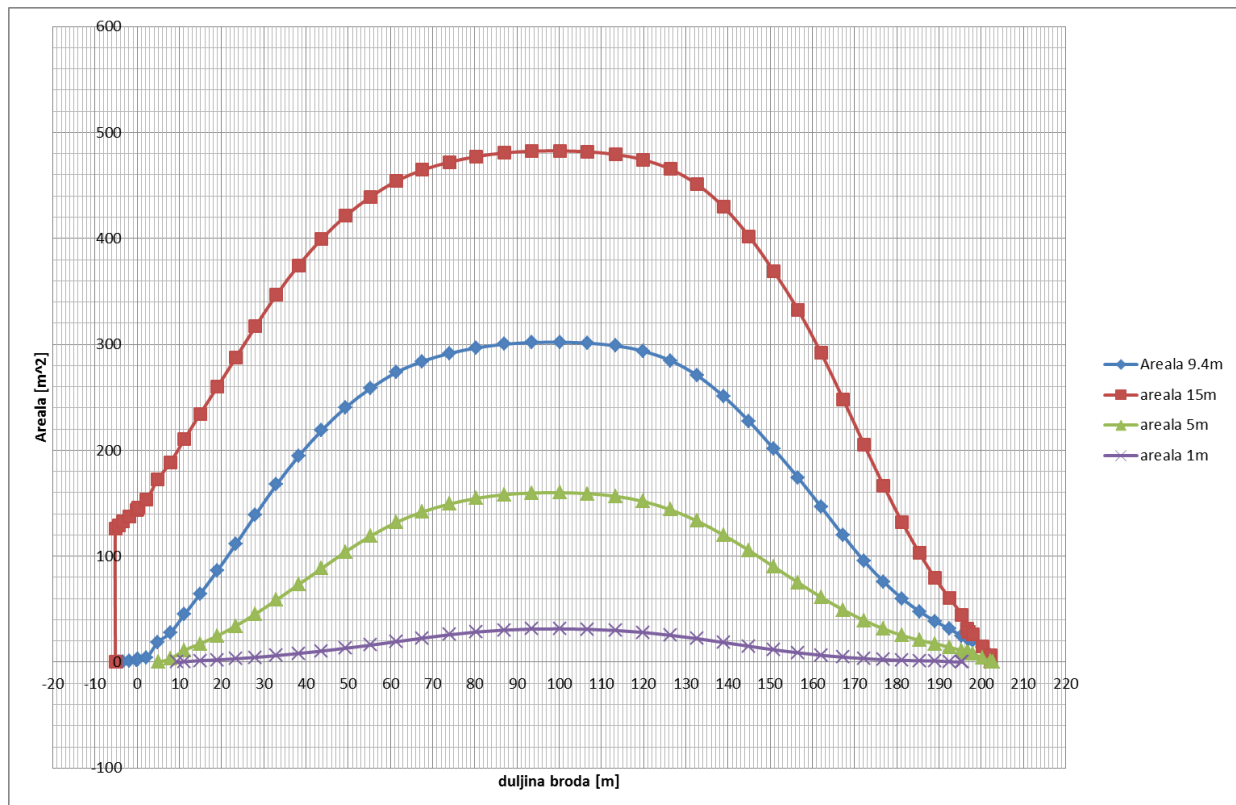
Cjelokupan tekstualni unos je dan u prilogu 3.



Slika 28 - Uzgon lakog broda za pravi trim



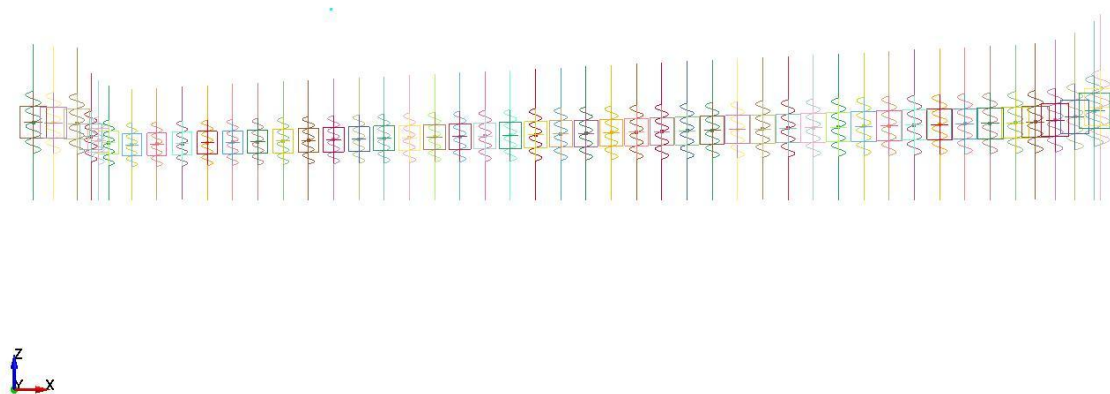
slika 29 - Uzgon brod – za različite gazove



Slika 30 - Areala rebara za projektni gaz od 9.4 m

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost

- Assembly 1
- FEM Parts
- Geom Parts
- Part 1



Slika 31 – prikaz modeliranih opruga uzgona u ls-dyna-i

## 3.2 LS-DYNA

LS-DYNA je napredni paketski program za simuliranje fizike stvarnoga svijeta. Razvijena je od LSTC-a (Livermore Software Technology Corporation) i sve se više i više razvija i daje veće mogućnosti za rješavanje mnogih kompleksnih problema. Originalnost programa leži u nelinearnoj dinamici analize konačnih elemenata, koristeći eksplicitnu vremensku integraciju. LS-DYNA se tako koristi u autoindustriji, industriji koja se bavi proučavanjem svemirskih letjelica, konstrukciji, vojsci, u procesima proizvodnje i biotehnici.

LS-DYNA se razvila od 3D programa za konačne elemente DYNA3D, koju je razvio Dr. John O. Hallquist at LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory) u 1976 g.. DYNA3D je bila napravljena sa idejom da simulira udare fuzije atomske bombe pri niskim amplitudama i brzine sudara od 40 m/s. Iako je na kraju taj projekt prekinut, DYNA3D se nastavila razvijati. DYNA3D koristi eksplicitnu vremensku integraciju za proučavanje nelinearnih dinamičkih problema. Program je u to vrijeme bio dosta jednostavan, najviše zbog računala koja su u to vrijeme postojala. 1979 g. je puštena u pogon nova verzija DYNA3D. U 1981 g. su još više razvili program pa su sada uveli još devet dodatnih materijala koji su onda omogućavali nove simulacije. 1982 g. dolazi do razvijanja u brzini programa, tako su svi proračuni smanjeni za 10%. U 1988 g. DYNA3D mijenja ime u LS-DYNA3D, a kasnije i u skraćeni oblik LS-DYNA.

Kada kažemo nelinearni problem, onda tu podrazumjevamo da su barem jedan ili svi navedeni slučajevi zakomplicirani:

- Promjena rubnih uvjeta (npr. Kontakt između partova koji se mijenja cijelo vrijeme)
- Velike deformacije (npr. raspadanje metalnih dijelova)
- Nelinearni materijali koji se ne ponašaju kao idealno elastični materijali

### 3.3 LS\_DYNA NAREDBE

Prije pokretanja proračuna potrebno je pažljivo fizikalno opisati model jer ako su modeli složeniji, pojedini proračuni mogu trajati danima što predstavlja svojevrsno ograničenje i ima svoju cijenu.

U ulaznu datoteku se unose potrebni podaci koje će LS-DYNA koristiti za vrijeme proračuna. Unos bloka podataka poč inje ključnom riječi nakon koje slijede pripadaju é i podaci. Slične funkcije su grupirane pod istom ključnom riječi, a ispred svake ključne riječi piše se zvjezdica (\*). Nailaskom na novu zvjezdicu prestaje blok p odataka i slijedi novi. Ako na prvom mjestu u redu piše dolar (\$), LS-DYNA taj red preskače jer to označava komentar.

NAREDBA \*LOAD\_NODE

Ključna riječ za definiranje koncentriranih sile opterećenja koje djeluju na brod. U našem slučaju koristit émo je za kočenje utezima i za silu otpora.

Varijable koje émo koristiti za definiranje ove ključne riječi:

NODE/NSID – čvor koncentrirane sile

DOF – aplicirane stupanj slobode

EQ.1: x-smjer koncentrirane sile

EQ.2: y-smjer koncentrirane sile,

EQ.3: z-smjer koncentrirane sile

EQ.4: „*follower force* „

EQ.5: moment oko x osi

EQ 6: moment oko y osi

EQ 7: moment oko z osi

EQ 8: „*follower moment*“

LCID – identifikator funkcije opterećenja

NAREDBA \*DEFINE\_CURVE\_FUNCTION

Ključna riječ DEFINE pruža cijeli niz načina da se definiraju kordinatni sustavi, krivulje opterećenja, tablice i orijentacijski vektori za razne upotrebe.

Definiranje krivulje (naprimjer, opterećenja (vrijednost na ordinati) na suprot vremenu (vrijednost na absici)) gdje je ordinata dana kao funkcijski izraz. Funkcija se može referirati na druge definicije krivulje, kinematičke vrijednosti, sile, interpolirane polinome i kombinacije istih.

Krivulje se definiraju u dvije kartice

\*DEFINE\_CURVE, u prvoj kartici smo zadali put u ovisnosti o koeficijentu otpora, odnosno za silu kočenja za utege

\*DEFINE\_CURVE\_FUNCTION, u drugoj funkcije smo napisali izraz za otpor broda u Is-dyna sintaksi

$$(CX(n1)*LCID)*VX(n1)*VX(n1)$$

Gdje su

CX(n1) – x koordinata za čvor n1

LCID – indetifikator krivulje

VX(n1) – komponenta brzine u x smjeru za translatorno gibanje čvora n1

Primjer:

```
$
*DEFINE_CURVE
150001
0, 0
10, 0.01
20, 0.02
30, 0.04
40, 0.06
50, 0.13
60, 0.21
70, 0.37
80, 0.63
```



90, 0.97  
 100, 1.45  
 120, 2.12  
 130, 2.96  
 140, 2.98  
 150, 2.93  
 160, 2.94  
 170, 2.93  
 180, 2.96

```
$
*DEFINE_CURVE_FUNCTION
12301
(CX(9999)*LC150001)*VX(9999)*VX(9999)
```

```
$
$
*LOAD_NODE
9999, 1, 12301
```

\$  
 Ili se može izraziti sljedećim izrazom

$$\text{POLY}(x, x_0, a_0, \dots, a_{30})$$

x se definira kao čvor čiju putanju pratimo, a  $x_0$  pomak od ishodišta. a predstavljaju konstante polinoma sa kojima približno definiramo krivulju koncentrirane sile.

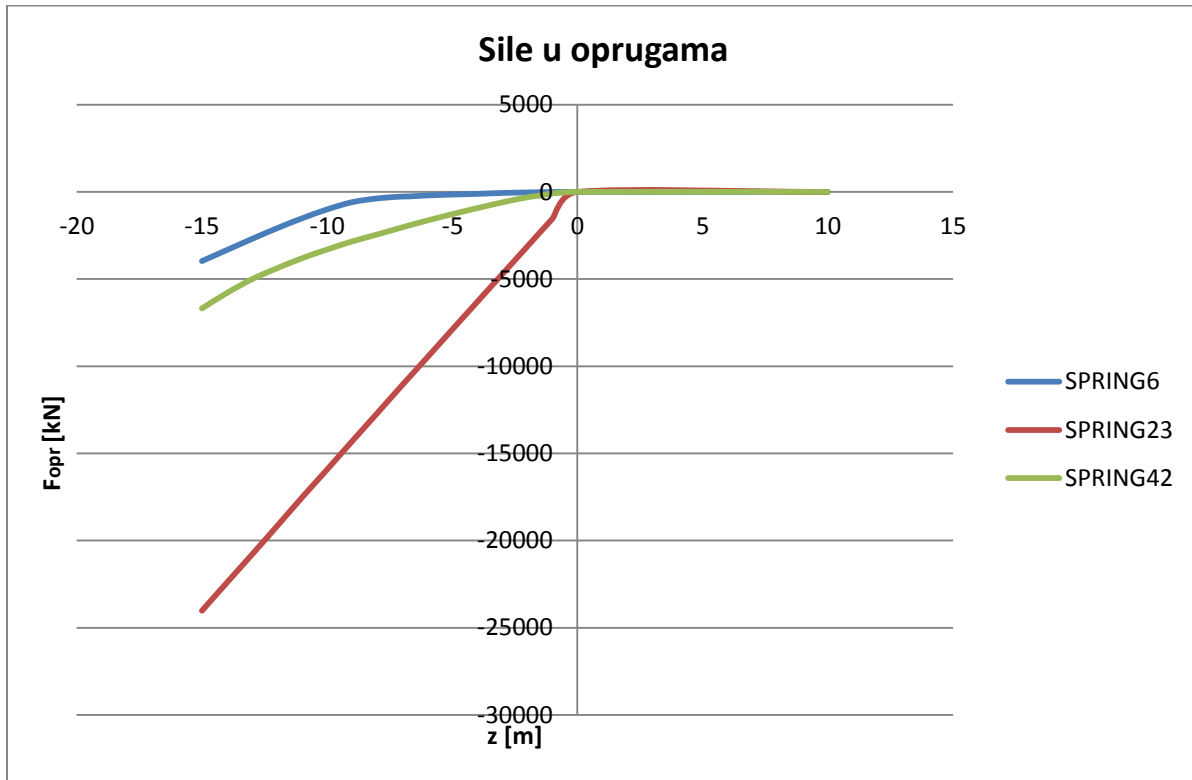
Primjer:

```
$
$
*LOAD_NODE
9999, 1, 12301
$
*DEFINE_CURVE_FUNCTION
12301
POLY(CX(9999)-118,0,1352.5,-175.5,3.693,-0.0195,4e-5,-4e-8,5e-
12)*VX(9999)*VX(9999)
$
```

#### NAREDBA \*MAT\_SPRING\_NONLINEAR\_ELASTIC

Odnosi se na opruge koje simuliraju uzgonske sile i prigušne elemente. Iz samog naziva naredbe vidi se da materijal osigurava nelinearnu ovisnost si le o pomaku opruge.

U poglavlju 3.1. opisan je način na koji se došlo do funkcije ovisnosti sile o pomaku za svih 46 opruga. Na slici 32. prikazane su krivulje uzgonskih sila za odabrane krivulje SPRING6 (PID 506), SPRING23 (PID 523) i SPRING42 (PID 542).



Slika 32 – sile u oprugama

Varijable korištene za \* MAT\_SPRING\_NONLINEAR\_ELASTIC su

MID – jedinstvena oznaka materijala i referira se na naredbu \*PART

LCD – oznaka krivulje kojom je opisana nelinearna karakteristika opruge i referira se na naredbu \*DEFINE\_CURVE

NAREDBA\*PART

Ključna riječ za definiranje nekog konačnog elementa je \*PART.

Varijable korištene u sklopu ove ključne riječi su

PID – jedinstvena identifikacijska oznaka dijela modela kojeg sačinjavaju elementi iste vrste i materijala

SECID – jedinstvena oznaka vrste elementa

MID – jedinstvena oznaka materijala elementa

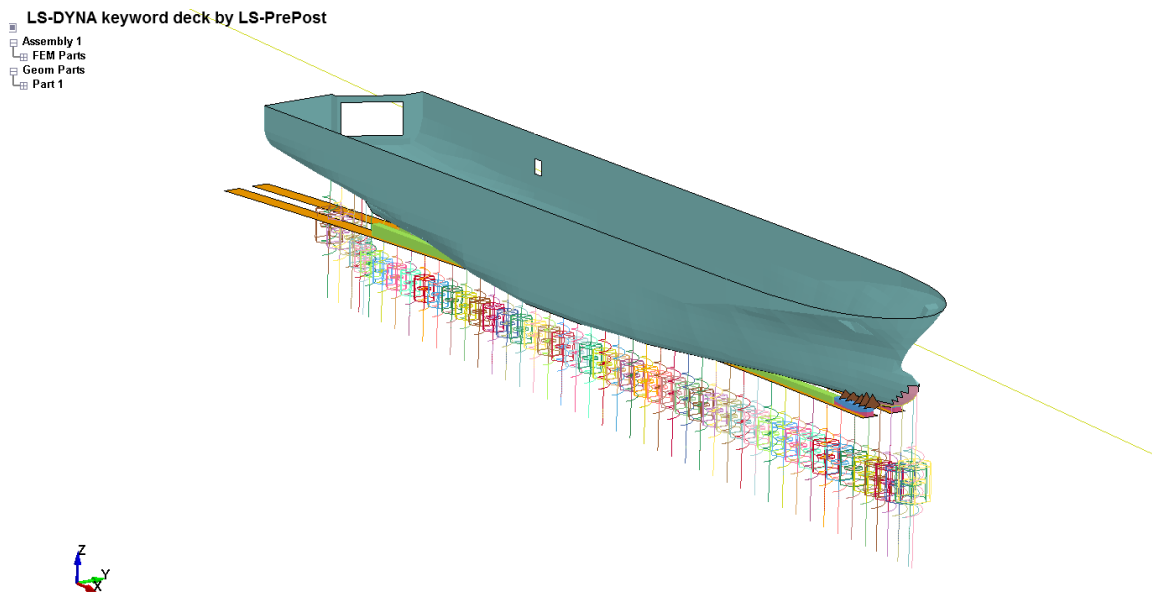
\*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE

Naredba definira faktore trenja između dvije površine koje klize jedna po drugoj, faktori trenja su označeni sljedećim varijablama

FS – statički faktor trenja

FF – dinamički faktor trenja

### 3.4 PRIKAZ ELEMENTA MODELA

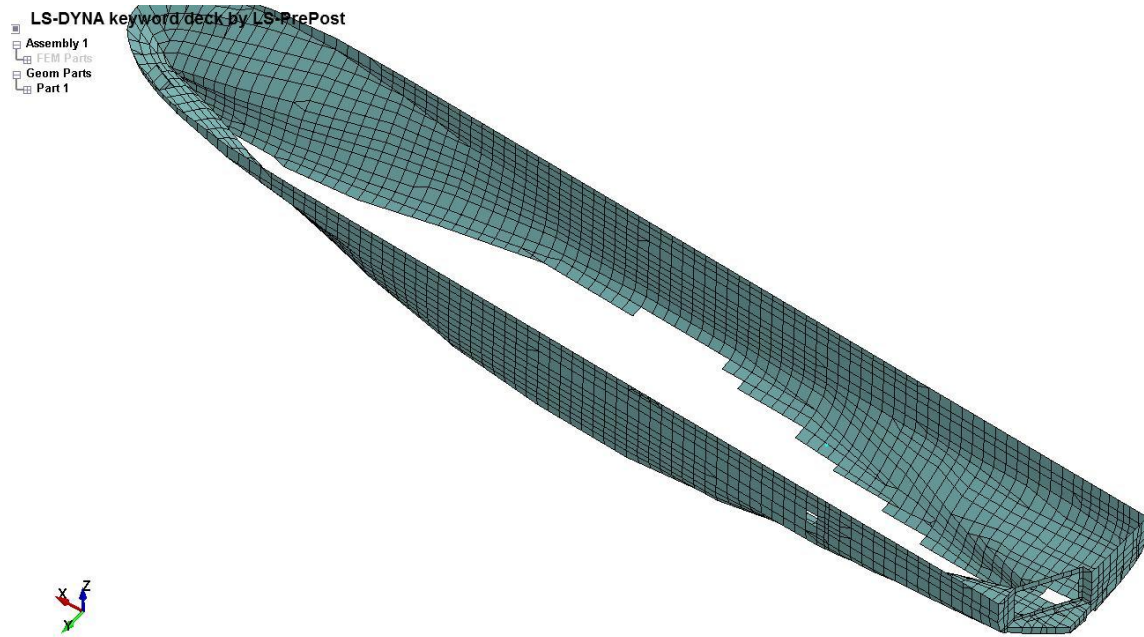


*Slika 33 – cjelokupni model u Ls-Dyna-i*

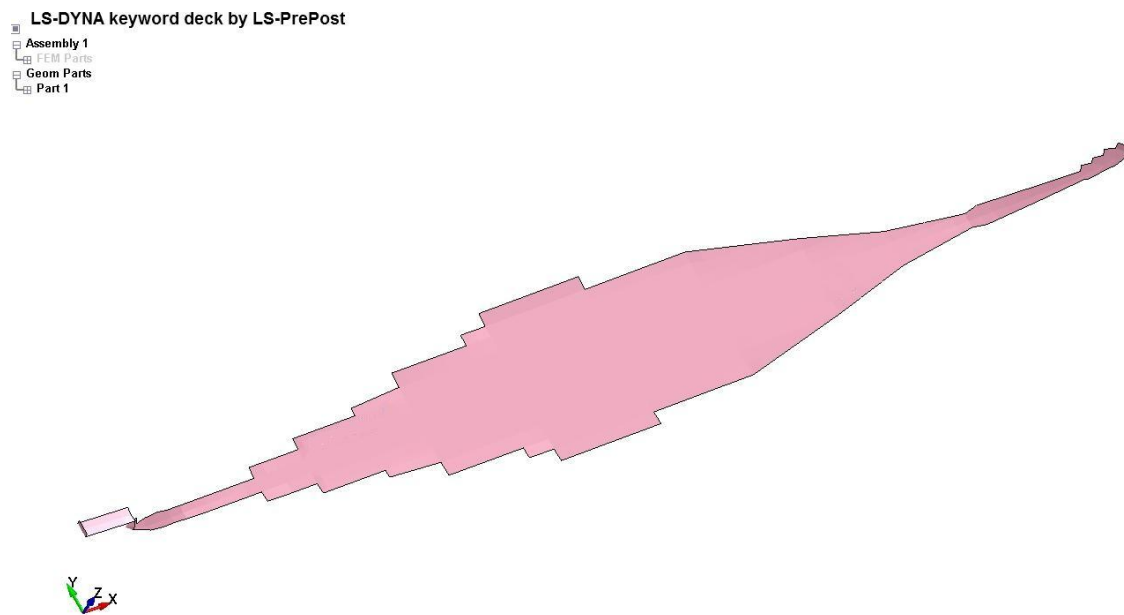
Modeliranje cjelina se radilo od krutih elemenata. Dno broda se moralo napraviti od elastičnih materijala, jer u suprotnom brod se nije htio spustiti niz navoz. Da bi se spriječile deformacije na dnu preko elastičnih pločastih elemenata napravljena je i mreža krutih grednih elemenata koji su se spojili sa pločastim u svim njihovim čvorovima.

Saonik i saonice napravljene su sa zakrivljenošću, koja odgovara stvarnoj zakrivljenosti, njihov spoj je definiran sa faktorom trenja kako je opisano u poglavlju 3.3. zipka je napravljena iz dva dijela, između njih je također definiran kontakt. Gornji dio zipke je spojen sa trupom broda elemenata potpornja zipke.

Popis svih cjelina modela je napisan u tablici 18.

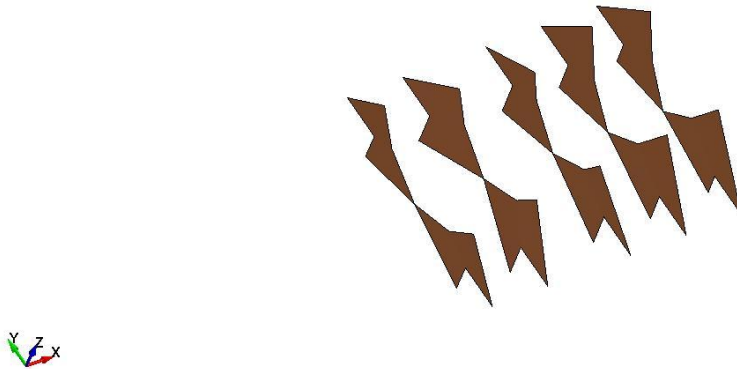


*Slika 34 – elementi trupa; PID 24*



*Slika 35 – elementi dna; PID 25*

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost  
Assembly 1  
FEM Parts  
Geom Parts  
Part 1



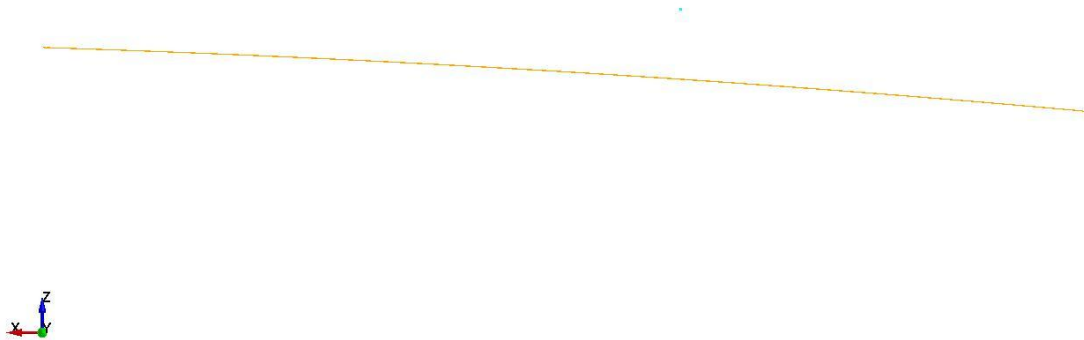
Slika 36 - elementi potpornja zipke; PID 50

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost  
Assembly 1  
FEM Parts  
Geom Parts  
Part 1



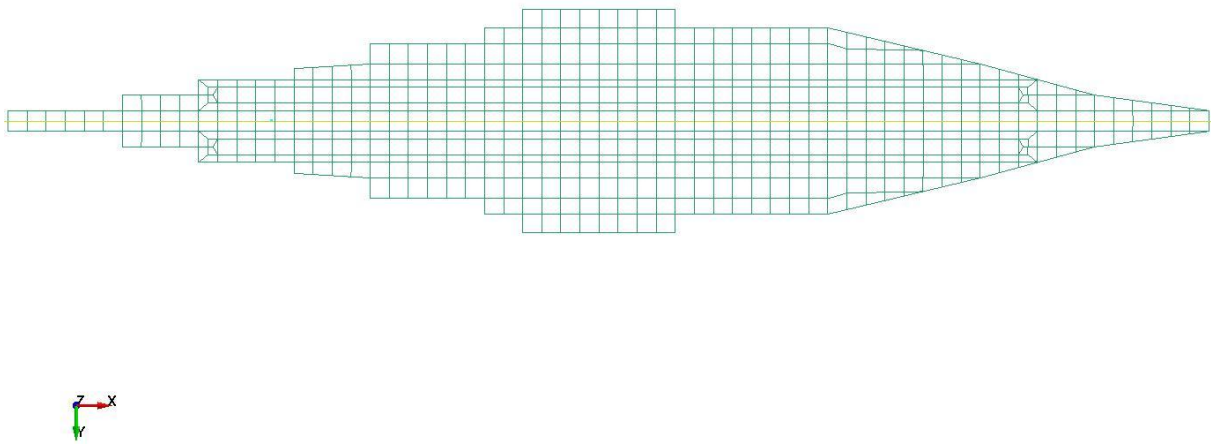
Slika 37 – prikaz elemenata saonika PID 75

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost  
Assembly 1  
FEM Parts  
Geom Parts  
Part 1



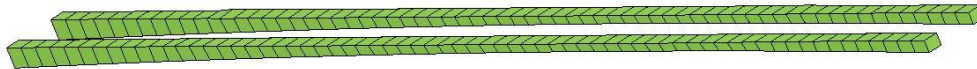
Slika 38 – prikaz zakrivljenosti saonika

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost  
Assembly 1  
FEM Parts  
Geom Parts  
Part 1



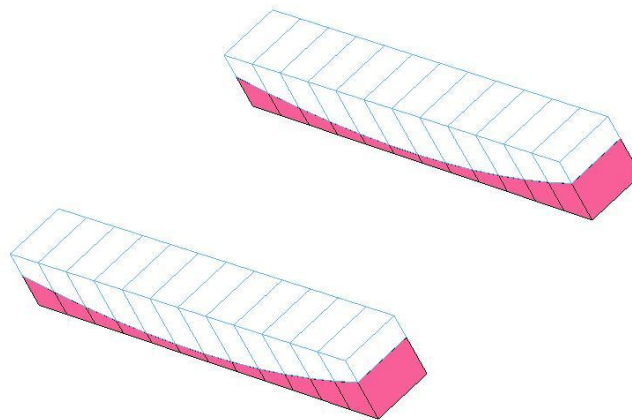
Slika 39 – prikaz grednih elemenata dna; PID 100

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost  
Assembly 1  
FEM Parts  
Geom Parts  
Part 1



*Slika 40 – prikaz elemenata saonica; PID 101*

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost  
Assembly 1  
FEM Parts  
Geom Parts  
Part 1



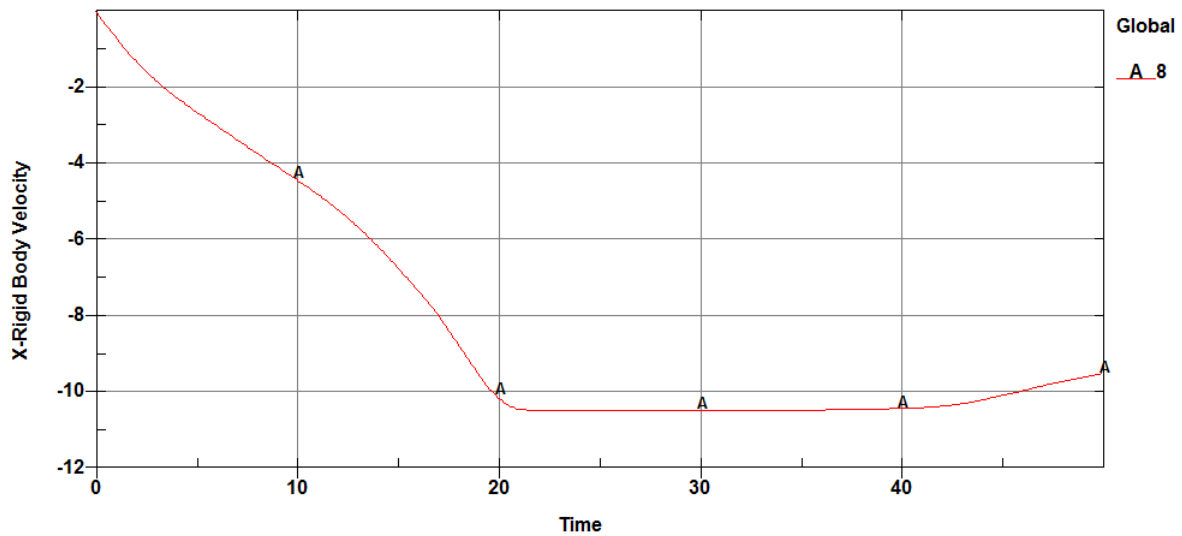
*Slika 41 – gornji i donji elementi zipke PID 201 i 202*



naziv parta	PID	broj elemenata
elementi trupa	24	2618
elementi dna	25	702
elementi potpornja zipke	50	20
elementi saonika	75	800
gredni elementi dna	100	1286
elementi saonica	101	49
dornji elementi zipke	201	100
donji elementi zipke	202	100
SPRING1	501	1
SPRING2	502	1
...	...	...
...	...	...
...	...	...
SPRING43	543	1
SPRING44	544	1
SPRING45	545	1
SPRING46	546	1
SPRING47	547	1

*Tablica 18 – popis cijelina*

### 3.5 REZULTATI IZ LS-DYNA-E



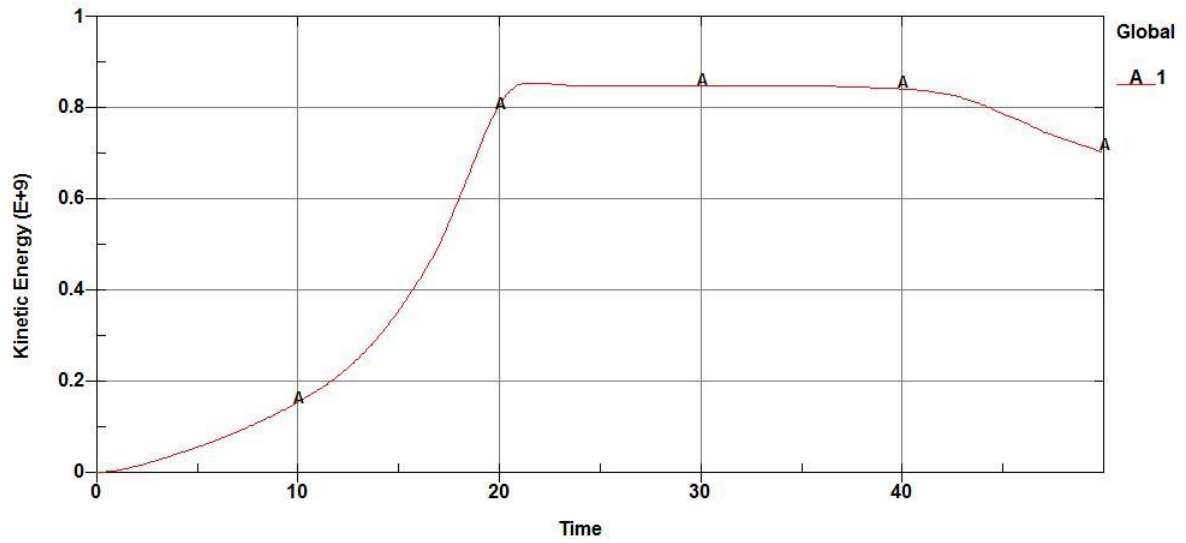
Slika 42 – proćunate brzine po putu, LS-DYNA

Na gornjoj slici je pokazan dijagram brzine po putu dobiven iz računalnog programa LS-dyna. Dijagram ne odgovara mjerenjima u stvarnosti ni rezultatima iz proraćuna analitićkim metodama. Međutim neke znaćajke porinuća su pogoćene približno poput maksimalne brzine koja je ipak malo povišena (10.2m/s). Najveća greška je otpor broda, koji poćnije imati utjecaj prekasno. Što je i uzrok povišene maksimalne brzine i daleko većeg otplova nego što bi trebao biti.

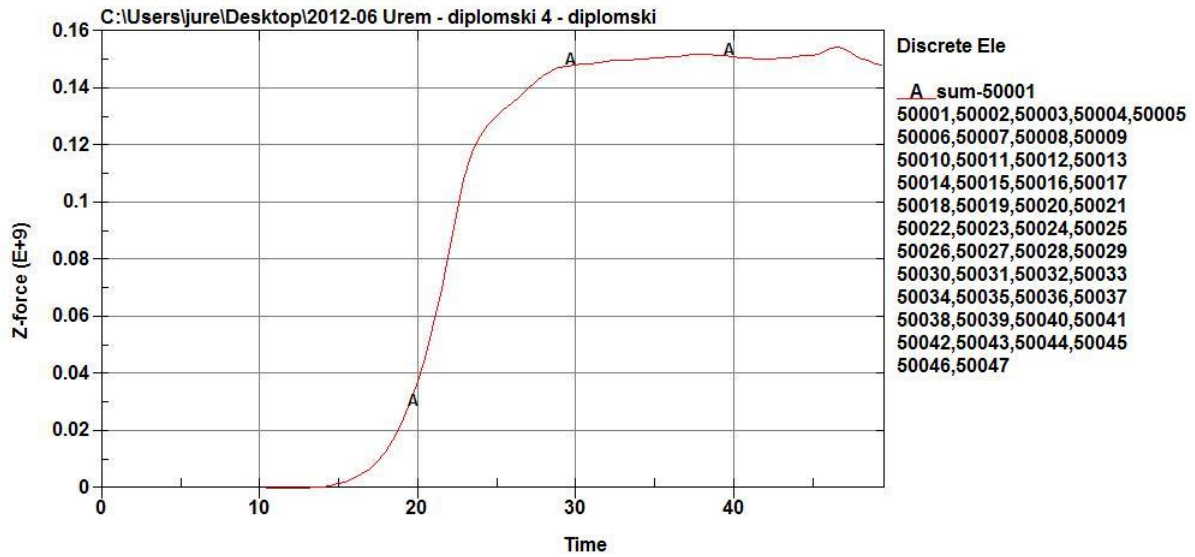
Uzrok ove greške je metoda sa kojom se definirao otpor broda, odnosno definiranje krivulje otpora po vremenu, što je nemoguće pogoditi iz prvih nekoliko pokušaja. Nažalost drugi naćini definiranje sintakse otpora broda kako su opisani u poglavlju 3.3 nisu radili na dostupnoj verziji LS-dyne, pa je prisilno napravljen proraćun sa ovom metodom. U budućnosti će se trebati uložiti još vremena u novijim verzijama verzijama LS-dyna-e da bi se u potpunosti dovršio ovaj problem.

Donji prikazani dijagram kinetićke energije pokazuje veliku sličnost kao i dijagram brzina. Odnosno i iz njega se moće zakljućiti da je glavni uzrok netoćnosti ovog proraćuna upravo u pogrešnom definiranju sintakse za otpor.

Još jedan razlog netoćnih rezultata je i sve veća rotacija broda broda oko težišta kako provealjuje put, što je vjerojatno uzrok stavljenog premalog prigušenja na opruge.

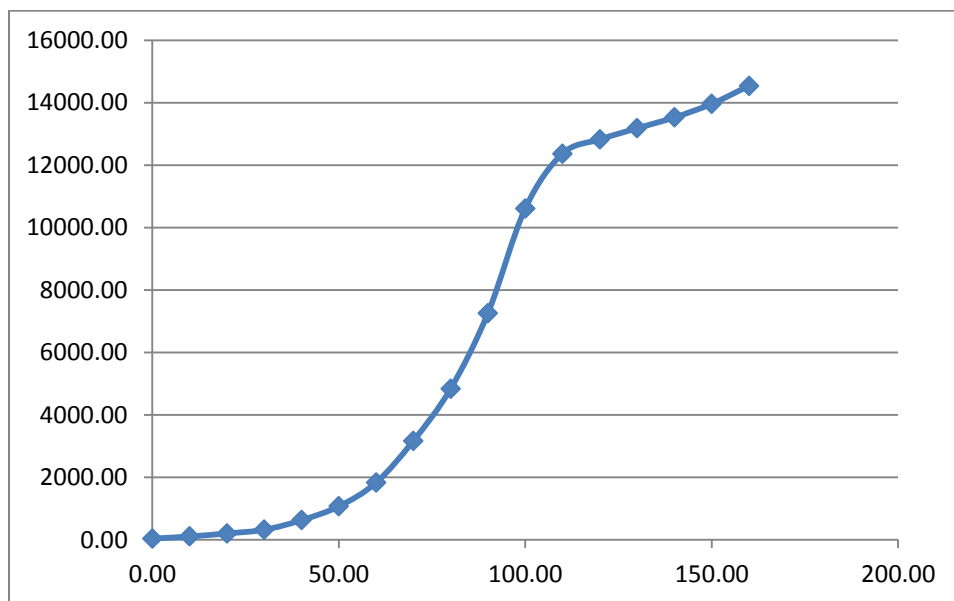


Slika 43 – kinetička energija po putu

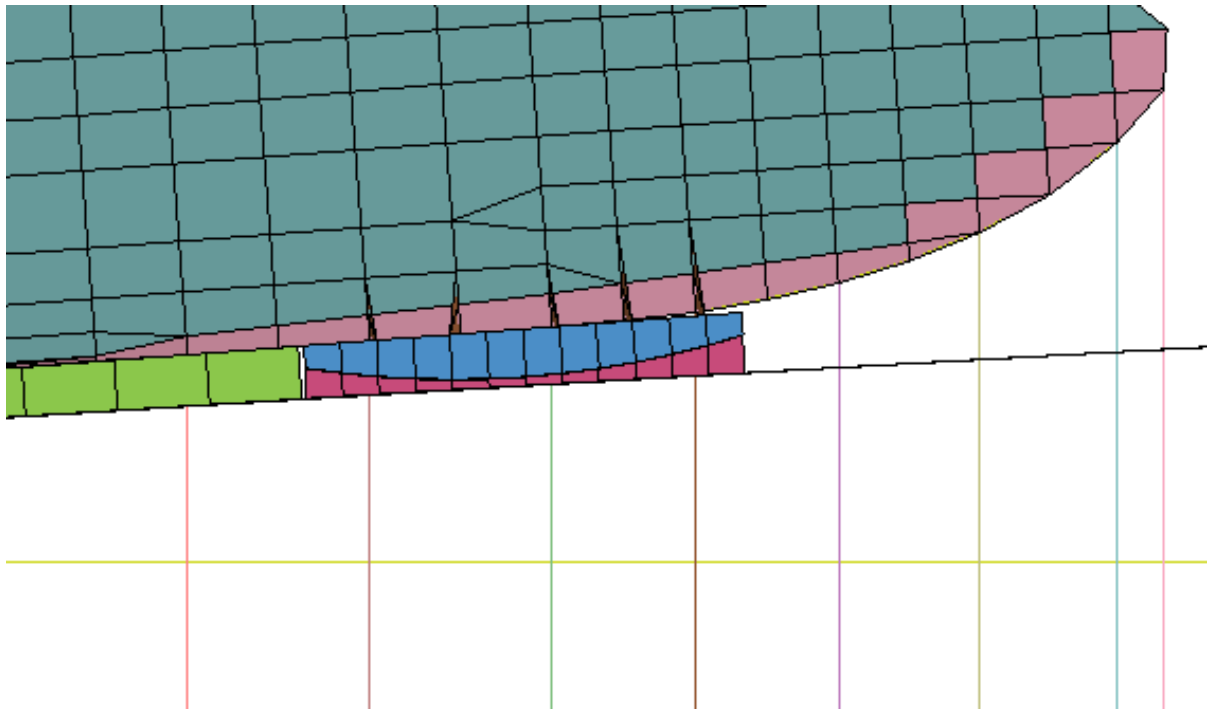


Slika 44 – Suma sila u oprugama LS-DYNA

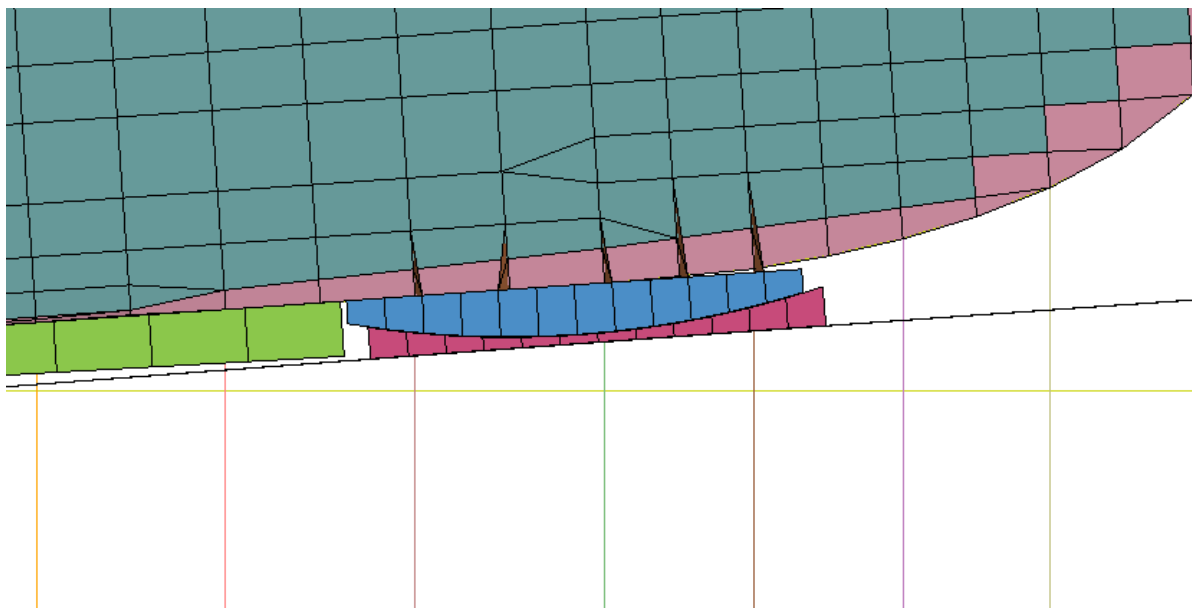
Dijagram suma sila u oprugama po vremenu, koje kako je već spomenuto zamjenjuju uzgon broda, pokazuje slične rezultate u usporedbi sa analitički poračunom uzgona koji je prikazan u slici ispod. To govori da je modeliranje opruga korektno napravljeno.



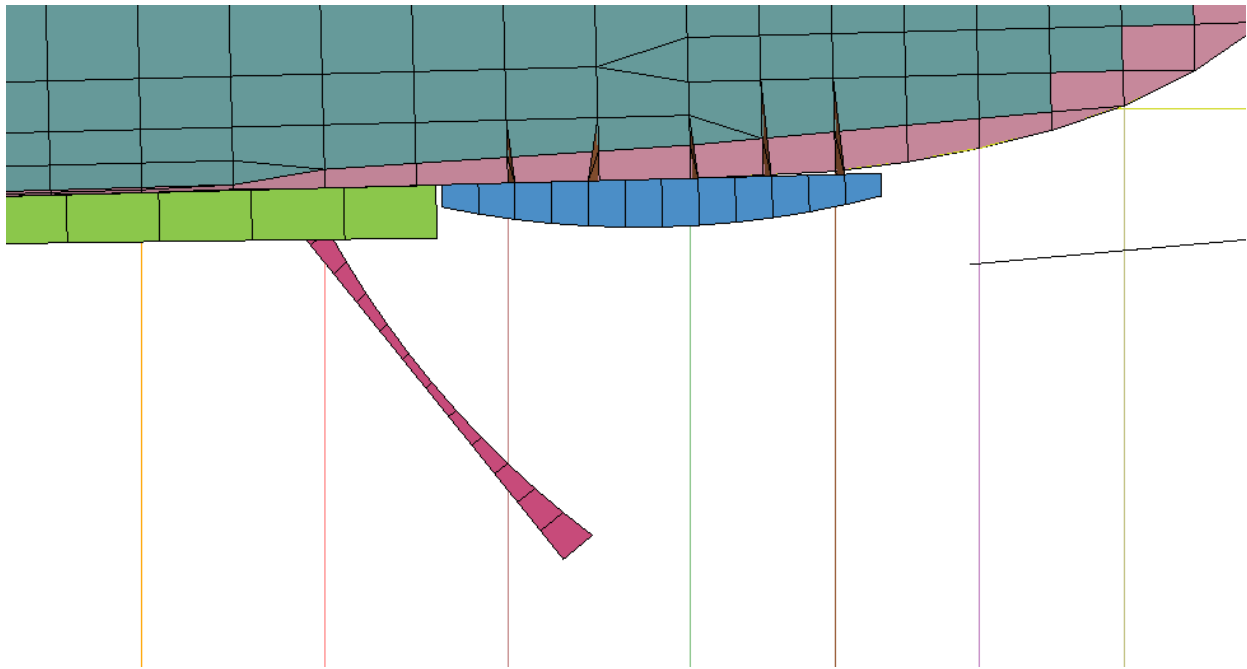
Slika 45 – uzgon broda po putu



*Slika 46 – ponašanje zipke tijekom prve i druge faze porinuća*



*Slika 47 – ponašanje zipke tijekom treće faze porinuća*

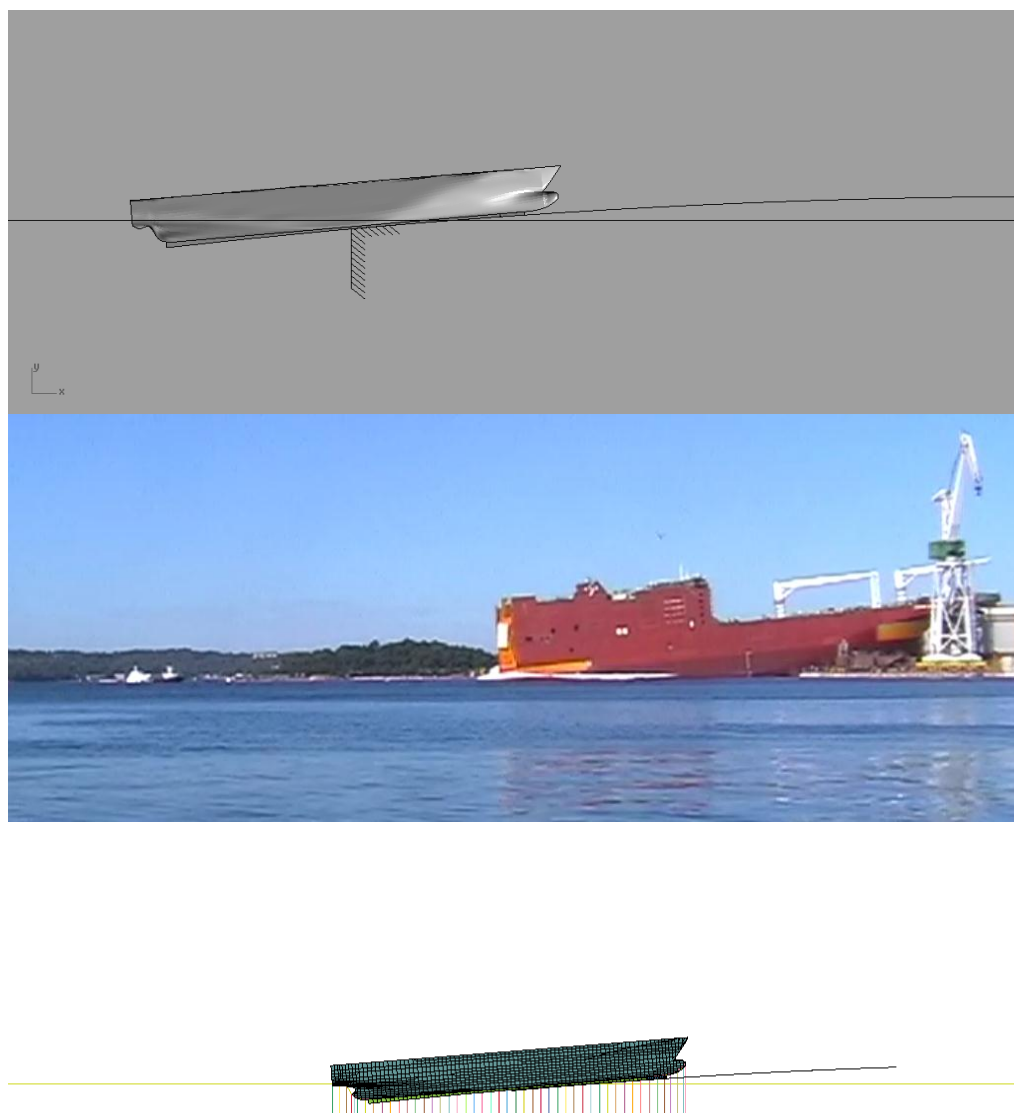


*Slika 48 – ponašanje zipke tijekom četvrte faze porinuća*

Gornje tri slike opisuju ponašanje zipke tijekom porinuća. Iz slika je vidljivo da je pravilno modeliranje uspješno simulirati realno ponašanje zipke, odnosno dopustilo je rotaciju broda u trećoj fazi porinuća i glatko spuštanje broda u more.

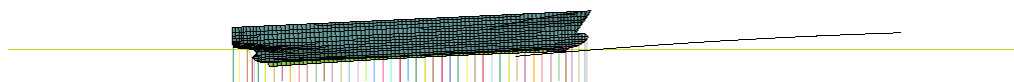
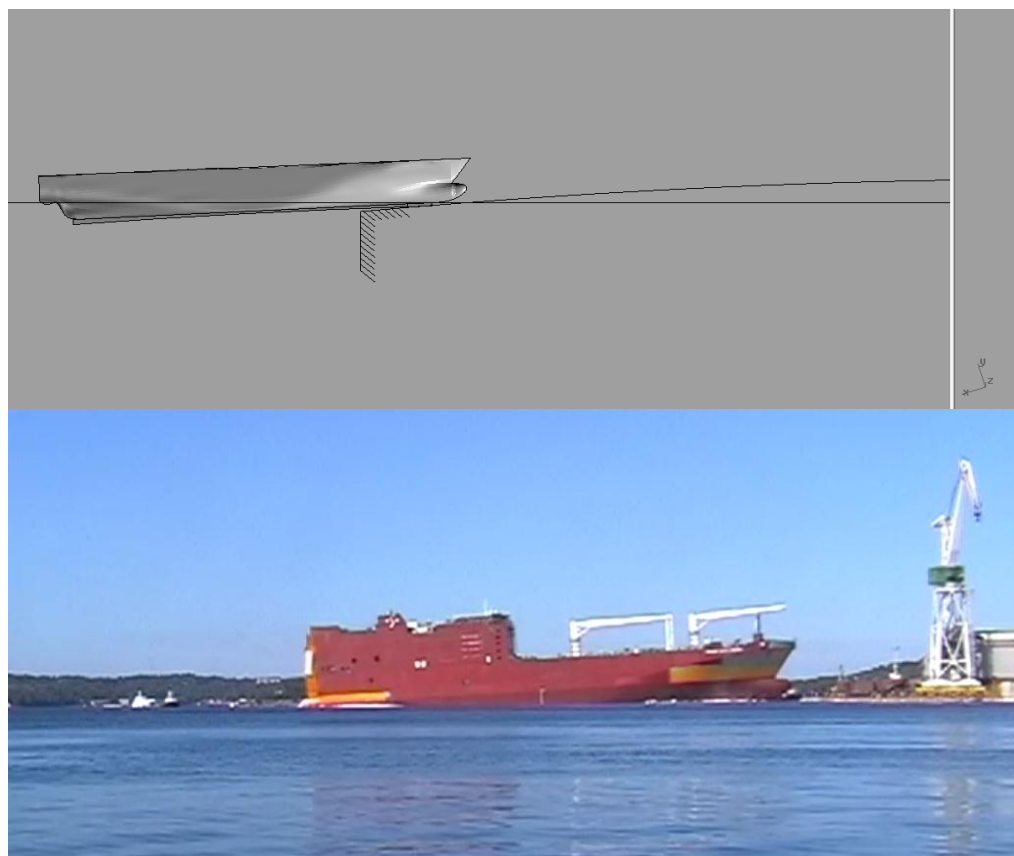


*Slika 49 –  $X=0$ ; grafička usporedba mjerenja, geometrijske nalize i LS-dyna-e*



*Slika 50 –  $X=150$ ; grefička usporedba mjerenja, geometrijske nalize i LS-dyna-e*





*Slika 51 –  $X=200$ ; grefička usporedba mjerenja, geometrijske nalize i LS-dyna-e*

### 3 ZAKLJUČAK

Proračun porivnjavanja broda je naizgled jednostavan problem, jer se može većinom opisati poznatim fizikalnim izrazima. Međutim u praksi to nije tako. Usporedbom mjerenja GPS-a i računatih metoda nam je pokazala točnost i prednosti pojedinih metoda, a najveći utjecaj na točnost računatih metoda je utjecao otpor broda pri porinuću i njoj pripadajući koeficijent otpora. Odnosno problem je definicije koeficijenta otpora za pojedinu metodu proračuna porinuća broda. Koeficijent otpora uvelike određuje kolika će biti sila otpora. Kako se iz sile otpora dobivaju sve ostale veličine koeficijent direktno utječe na najvažnije stavke proračuna, poput maksimalne brzine broda, kočenje broda, odnosno na duljinu otplova .

Neki izrazi za koeficijent otpora su davali prevelike vrijednosti, pa je kočenje bilo preveliko. Pametnim izborom izraza za koeficijent otpora riješili su se ovi problemi. U metodi rješavanja porinuća jednadžbom bilance energije primjetna su odstupanja od ostalih metoda i mjerenja, to je jednostavno zato jer nijedan od ponuđenih izraza za koeficijent otpora nije dovoljno dobro pratio rasipanje formule. Pa bi se u budućnosti trebali razmotriti neki drugi izrazi koji ovim radom nisu pokriveni.

Modeliranje i analiziranje u LS-dyna-i stvorilo je cijeli niz očekivanih i neočekivanih problema, koji se neki od njih nažalost nisu riješili u sklopu ovog diplomskog. Neki su rezultat nedostatka vremena koje je predviđeno za pisanje diplomskog zadatka, dok su drugi rezultat što se proračuni nisu odvijali na najnovijoj verziji LS-dyna-e i premali broj raspoloživih računala sa podrškom LS-dyna-e. Najveći problem je bila pravilna definicija krivulje kočenja broda. Isprobane sintakse za definiciju te krivulje jednostavno nisu radili, pretpostavka je da je problem u starijoj verziji LS-dyne-e.

Uz sve te probleme nije čudno da inženjerski posao proračunavanja porinuća broda jedan od najstresnijih zadataka za inženjera. Zato jer ako se napravi loš proračun moguće je zaustavljanje broda na navozu ili preveliki otplov broda, što je je možebitni problem ako se nasuprot vlake nalazi obala. U oba slučaja nastaje velika materijalna šteta na brodu i velika materijalna šteta za brodogradilište za koje je izravno odgovoran inženjer koji je radio proračun.

[1] STABILITET BRODA 1 – Josip Uršić

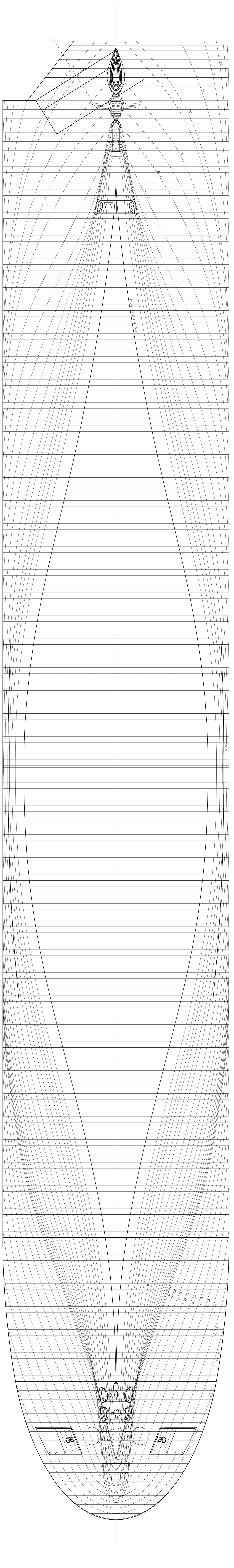
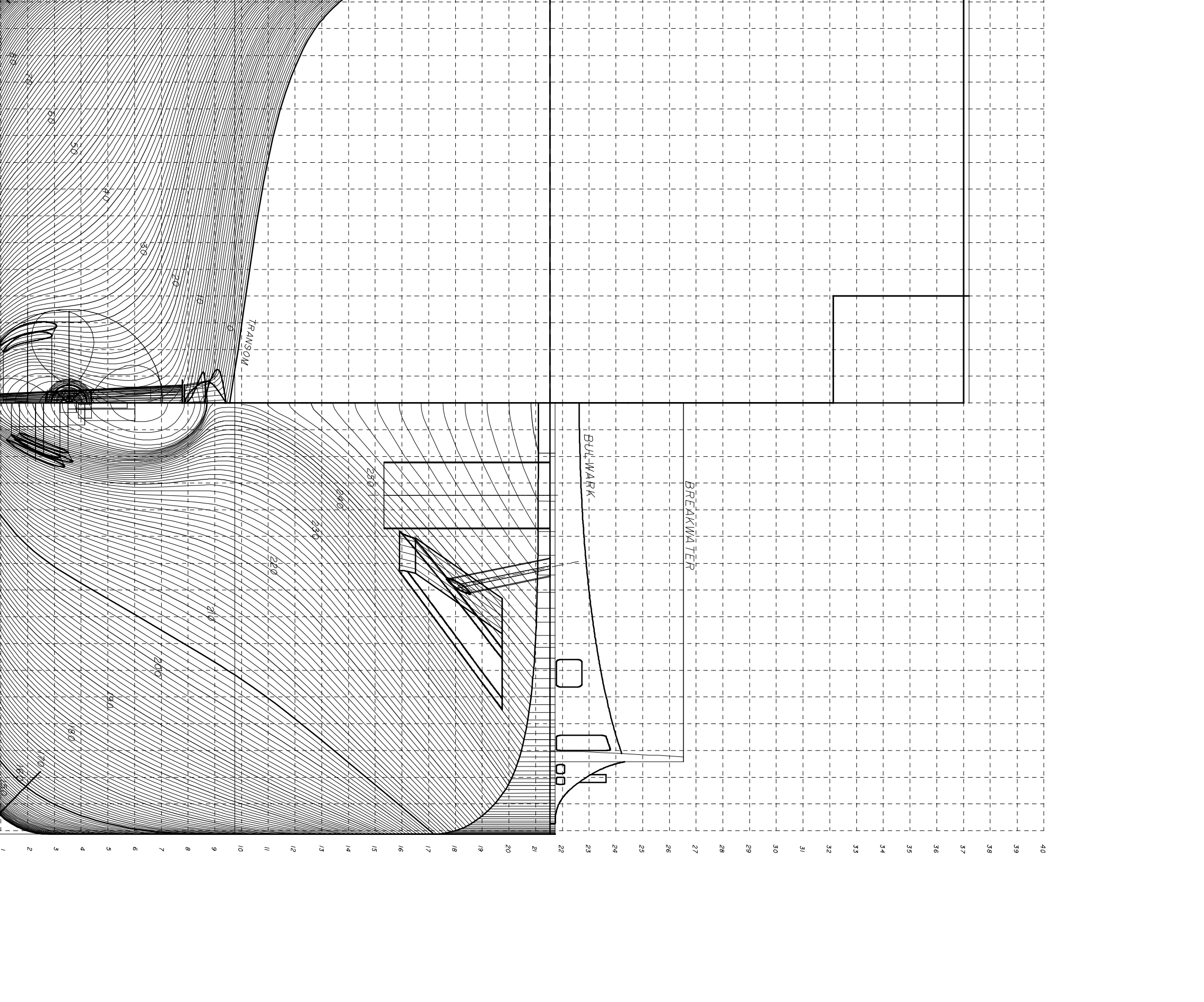
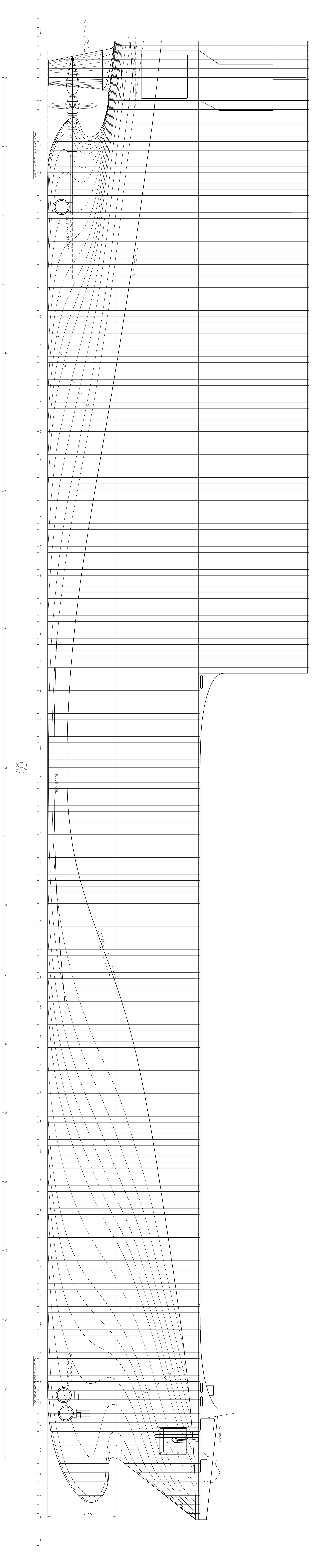
[2] Statics and Dynamics of the Ship: Theory of Buoyancy, Stability and Launching - Vladimir Semyonov-Tyan-Shansky

[3] USPOREDBA OTPORA BRODA ODERĐENOG RAZLIČITIM METODAMA; Matulja,Dejhalla

[4] LS-DYNA Keyword user's manual

## **PRILOG 1**

### **Nacrt rebara iz brodogradilišta ULJANIK**



**FRAME SPACING**  
 FRAME 8 - 1' ..... 650  
 FRAME 7 - 230 ..... 621  
 FRAME 280 - 250 ..... 650

**MAIN DIMENSIONS**  
 LENGTH OVERALL ..... 270.32 m  
 LENGTH B.P.P. .... 256.60 m  
 BREADTH MOULDED ..... 32.26 m  
 DEPTH TO DECK 6 ..... 7.53 m  
 DEPTH TO DECK 5 ..... 9.40 m  
 DISPLACEMENT ..... 39962.6 t  
 BLOCK COEFFICIENT ..... 0.6914  
 LCB ..... -1027 m

NO CHANGES RELATED TO PREVIOUS SISTER VESSELS 472.473

NO.	DATE	BY	REVISION
1	11.01.2013	A	INITIAL DESIGN
2	11.01.2013	B	REVISION
3	11.01.2013	C	REVISION
4	11.01.2013	D	REVISION
5	11.01.2013	E	REVISION
6	11.01.2013	F	REVISION
7	11.01.2013	G	REVISION
8	11.01.2013	H	REVISION

**BODY LINES - PRELIMINARY**

NO. 1	DATE 11.01.2013	BY A	REVISION INITIAL DESIGN
NO. 2	DATE 11.01.2013	BY B	REVISION
NO. 3	DATE 11.01.2013	BY C	REVISION
NO. 4	DATE 11.01.2013	BY D	REVISION
NO. 5	DATE 11.01.2013	BY E	REVISION
NO. 6	DATE 11.01.2013	BY F	REVISION
NO. 7	DATE 11.01.2013	BY G	REVISION
NO. 8	DATE 11.01.2013	BY H	REVISION

## **PRILOG 2**

### **Proračun porinuća iz brodogradilišta ULJANIK**

## **PRILOG 3**

### **Tablični prikaz opruga**

PID	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510
X	-5.2	-1.3	3.25	5.75	7.15	9.1	13.513	18.439	23.365	28.291
-15	2566.432	2773.721	6833.125	6298.768	3149.89	3968.099	7335.709	12208.51	14312.92	15809.04
-14	1934.058	2151.146	5430.493	5137.246	2610.624	3330.329	6246.582	10609.51	12775.18	14270.81
-13	1340.196	1548.276	4134.489	4037.769	2075.368	2697.156	5221.085	9103.51	11160.57	12655.29
-12	792.1021	985.0625	2881.308	2964.849	1556.904	2083.407	4194.707	7583.689	9592.857	11085.91
-11	324.4809	482.2054	1705.761	1956.83	1081.997	1515.503	3227.226	6126.961	7979.962	9446.684
-10	52.97533	137.7097	799.208	1129.106	659.0392	1003.313	2359.126	4746.213	6448.127	7889.327
-9	1.473199	11.29452	308.5533	577.0029	354.3232	589.2795	1578.351	3515.985	5061.277	6363.811
-8	0	27.49747	197.8836	292.916	202.4539	373.1799	1057.489	2492.736	3795.648	5036.056
-7	0	0	53.17008	150.8268	126.4756	265.0324	800.7603	1903.952	2913.62	3893.092
-6	0	0	7.443258	77.18212	88.52632	201.2134	616.5396	1468.99	2256.338	3024.98
-5	0	0	0	35.48062	50.57876	152.1137	496.3588	1139.762	1735.38	2330.367
-4	0	0	0	17.73681	29.49846	112.8363	384.202	869.3378	1288.885	1710.251
-3	0	0	0	1.774022	2.950413	59.37312	259.3862	596.9033	872.6437	1150.303
-2	0	0	0	0	1.684879	29.42251	134.4111	331.1413	499.2216	660.2608
-1	0	0	0	0	0	4.902882	34.39673	102.1425	165.9648	235.3233

PID	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520
X	33.217	38.143	43.069	47.995	52.921	57.847	62.773	67.699	72.625	77.551
-15	17280.23	18551.93	19823.64	20870.92	21594.05	22242.37	22766.01	23140.04	23464.2	23713.56
-14	15666.73	16962.95	18109.6	19106.69	20103.77	20764.34	21138.25	21562.01	21861.14	22110.41
-13	14050.37	15358.25	16529.11	17513.13	18297.86	18982.94	19518.55	19904.68	20216.08	20465.2
-12	12417.21	13711.19	14880.75	15888.56	16709.74	17344.28	17866.85	18289.88	18593.47	18817.43
-11	10813.97	12106.67	13275.08	14269.46	15089.83	15761.05	16283.1	16680.85	16979.17	17202.91
-10	9255.982	10535.67	11658.81	12627.89	13455.34	14138.67	14660.48	15058.05	15368.66	15604.72
-9	7653.94	8931.664	10048.12	11015.72	11834.46	12504.33	13025.34	13422.31	13732.43	13980.54
-8	6251.656	7392.831	8459.582	9414.696	10233.36	10915.59	11436.56	11833.49	12131.19	12354.46
-7	4922.158	5963.622	6955.492	7872.972	8666.469	9311.185	9819.518	10216.27	10526.23	10761.8
-6	3857.594	4713.019	5554.062	6359.897	7091.347	7723.618	8219.516	8616.235	8926.172	9149.326
-5	2950.146	3619.507	4313.659	4983.019	5615.193	6185.39	6644.026	7015.893	7325.782	7561.298
-4	2156.404	2644.693	3177.598	3705.545	4213.663	4684.602	5105.968	5465.369	5750.411	5973.487
-3	1467.628	1809.744	2176.651	2563.391	2952.61	3321.996	3651.716	3946.73	4199.598	4402.884
-2	847.3141	1060.381	1288.314	1533.589	1783.819	2034.049	2274.369	2494.869	2693.071	2859.066
-1	315.8286	407.4808	510.2799	624.2259	743.1261	866.9804	995.7889	1124.597	1250.929	1361.159



PID	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530
X	82.477	87.403	92.329	97.255	102.181	107.107	112.033	116.959	121.885	126.811
-15	23850.7	23950.44	24025.25	24087.59	24075.12	24000.32	23900.57	23775.9	23526.54	23090.17
-14	22259.97	22334.76	22409.54	22446.93	22446.93	22397.07	22297.37	22135.34	21873.6	21474.77
-13	20639.59	20739.24	20801.52	20826.43	20813.97	20764.15	20676.96	20527.48	20253.45	19847.39
-12	18986.64	19098.62	19173.27	19210.6	19198.16	19148.39	19048.85	18887.1	18625.82	18240.11
-11	17364.5	17463.93	17526.08	17575.8	17575.8	17526.08	17426.65	17252.63	16991.6	16593.85
-10	15766.23	15865.62	15927.74	15965.02	15965.02	15902.9	15803.5	15716.53	15455.63	15008.36
-9	14141.8	14241.04	14303.07	14340.28	14340.28	14278.26	14191.42	14030.16	13769.65	13434.71
-8	12528.12	12644.72	12699.3	12731.55	12726.58	12664.56	12577.74	12428.89	12168.4	11771.47
-7	10922.97	11022.16	11084.15	11121.35	11121.35	11071.75	10972.57	10823.79	10563.42	10179.07
-6	9322.89	9434.467	9496.455	9521.25	9508.852	9471.66	9384.878	9223.711	8975.761	8628.633
-5	7722.44	7834.001	7895.978	7920.77	7912.093	7862.51	7772.023	7623.276	7400.156	7077.871
-4	6134.598	6241.179	6303.144	6332.888	6325.452	6275.879	6184.17	6047.846	5837.163	5552.121
-3	4551.63	4653.273	4715.251	4742.521	4735.084	4690.46	4613.608	4489.653	4308.678	4073.164
-2	2985.42	3074.611	3126.639	3148.936	3143.981	3109.296	3047.358	2948.257	2807.038	2631.133
-1	1444.142	1502.353	1538.271	1553.133	1549.418	1529.601	1492.445	1432.995	1347.535	1241.021

PID	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540
X	131.737	136.663	141.589	146.515	151.441	156.367	161.293	166.219	171.145	176.071
-15	22516.66	21781.07	20870.92	19586.75	18115.56	16594.5	14811.62	12779.39	10672.35	8615.178
-14	20901.44	20166.09	19193.93	17935.11	16551.65	15018.63	13286.19	11404.19	9447.402	7552.936
-13	19299.32	18559.44	17587.87	16392.09	15034.39	13527.21	11883.02	10114.27	8308.151	6589.223
-12	17680.22	16933.69	15988.09	14818.54	13512.12	12093.72	10538.46	8908.541	7278.627	5748.249
-11	16059.36	15350.86	14431.05	13299.94	12069.38	10751.82	9309.955	7818.374	6289.502	4947.079
-10	14449.27	13741.1	12883.83	11815.35	10635.06	9417.496	8150.234	6808.427	5528.741	4360.872
-9	12901.29	12181.8	11338.25	10333.44	9266.602	8162.549	6996.47	5817.987	4701.529	3696.717
-8	11250.5	10630.3	9861.242	8943.341	7963.418	6958.688	5941.554	4924.419	3969.305	3138.232
-7	9707.933	9112.811	8406.103	7587.81	6707.525	5827.239	4959.353	4103.864	3285.571	2591.262
-6	8169.926	7624.438	6992.168	6260.718	5504.472	4748.227	4016.777	3322.519	2677.851	2112.527
-5	6668.817	6185.39	5639.985	5020.206	4375.636	3743.462	3123.684	2565.883	2065.102	1631.257
-4	5205.113	4796.14	4337.594	3829.476	3308.965	2800.847	2329.908	1896.148	1511.961	1189.74
-3	3788.067	3465.784	3103.835	2709.658	2320.439	1946.095	1594.062	1284.175	1013.953	785.8752
-2	2423.021	2185.178	1927.516	1654.988	1387.415	1139.662	914.2073	719.7215	556.2047	416.2245
-1	1122.12	989.5962	845.9252	701.0156	566.0144	447.1142	341.838	253.9014	184.543	128.8085

PID	541	542	543	544	545	546	547
X	180.997	185.923	189.823	193.723	197.623	201.523	203.073
-15	6682.685	5079.339	3388.764	2092.629	1154.894	444.1902	82.76364
-14	5795.57	4337.33	2869.564	1756.44	996.6319	424.3086	82.73639
-13	5007.311	3736.799	2488.416	1538.414	926.9933	445.7457	90.95458
-12	4379.618	3272.271	2195.833	1379.087	866.855	445.2482	90.85307
-11	3803.533	2858.865	1959.828	1259.639	826.6378	444.8099	90.76362
-10	3304.82	2522.1	1747.453	1160.696	621.7167	129.8964	0
-9	2840.766	2208.106	1566.962	1080.346	766.0634	424.337	90.6218
-8	2443.603	1935.036	1400.15	982.0525	707.0778	404.6614	90.61442
-7	2033.335	1636.586	1199.577	834.3613	598.7769	335.4108	69.75052
-6	1641.424	1314.131	966.2544	667.4394	451.5031	221.6475	38.28114
-5	1276.744	1016.437	739.5717	496.5777	304.2275	114.1098	11.15984
-4	929.4845	731.1945	521.817	337.5278	180.5381	49.05927	0
-3	599.9426	463.592	299.8248	178.6101	82.43541	5.888243	0
-2	307.2133	239.0813	163.1343	82.38304	23.53801	0	0
-1	89.17513	68.11989	41.05372	11.81571	0.048793	0	0