

# Automatizirana priprema ulaznih podataka za proračun pomorstvenosti na osnovu analitički zadane forme broda

---

Oreč, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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:235:536120>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-17**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Ivan Oreč**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatipović, dipl. ing.

Student:

Ivan Oreč

Zagreb, 2021.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Ovaj diplomski rad nastao je kao rezultat tromjesečnog svakodnevnog rada i truda. Dok sam radio razmišljao kako sam došao do ove da polažem svoj posljednji ispit i završavam svoj diplomski studij. Tada su mi u pamet došli svi moji odgajatelji/ce, učitelji/ce, profesori/ce koji su svojim svakodnevni radom i trudom, neumorno utiskivali za mene uvijek nove spoznaje i vrijednosti, koje su me dovele do ovoga časa. Njih je jako puno pa ih ovdje neću nabrajati, ali vjerujem da će se oni sebe prepoznati. Svima njima dužan sam svoju iskrenu zahvalnosti i poštovanje. Njima je glavnim djelom i posvećen ovaj rad.

Naravno ništa bez mentora. Prvo moram se zahvaliti profesoru Peri Prebegu, koji me naučio osnove programiranja i uvijek je bio na raspolaganju kod mi je trebala pomoć tokom izrade koda za automatizaciju. Isto tako zahvaljujem se svome mentoru i profesoru Ivanu Čatipoviću, koji mi je pomogao u ponekad zamršenom području pomorstvenosti broda.

Hvala i mojoj obitelji, i prijateljima, i kolegama.

Hvala i Tebi dragi Bože, jer si početak i završetak svakog dobrog dijela.

Ivan Oreč



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Ivan Oreč** JMBAG: 0035203631

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Automatizirana priprema ulaznih podataka za proračun pomorstvenosti na osnovu analitički zadane forme broda**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Automatic preparation of input data for seakeeping analysis based on analytic hull form model**

Opis zadatka:

Analitičko zadavanje forme broda ima široku primjenu u ranim fazama projektiranja broda jer omogućuje jednostavno modificiranje forme broda putem promjene manjeg broja parametara. Program otvorenog koda *d3v-gsd* (*Design visualizer for General ship design*) proširenje je programa *linaetal-fsb/d3v*, koji omogućuje trodimenzijsku (3D) vizualizaciju geometrijskih entiteta te jednostavno definiranje grafičkog sučelja za pojedine specifične namjene. U radu je potrebno, proširenjem funkcionalnosti programa otvorenog koda *d3v-gsd* u programskom jeziku Python, omogućiti automatiziranu pripremu ulaznih podataka za proračun pomorstvenosti Hydrostar-om (Bureau Veritas) za analitički zadanu formu broda.

Zadatak obuhvaća sljedeće:

- upoznavanje s trenutnom verzijom programa otvorenog koda *d3v-gsd*, koja uz 3D vizualizaciju omogućuje i triangularizaciju forme broda te izračun pripadnih hidrostatičkih karakteristika
- odabir mjera kvalitete pomorstvenosti broda, prikladnih za primjenu u inicijalnoj fazi osnivanja broda
- izradu Python modula za automatiziranu pripremu ulaznih podataka za proračun pomorstvenosti Hydrostar-om za analitički zadanu formu broda
- izradu Python modula koji omogućuje izvršavanje Hydrostar proračuna na osnovu generiranih ulaznih podataka te automatizirano učitavanje i vizualizaciju mjera kvalitete pomorstvenosti broda nakon proračuna
- izradu grafičkog sučelja u okviru programa otvorenog koda *d3v-gsd* koje omogućuje promjenu parametara analitički zadane forme te vizualizaciju rezultata nakon proračuna
- analizu utjecaja pojedinih parametara analitički zadane forme broda na razmatrane mjere kvalitete pomorstvenosti broda na zadanom primjeru.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan: Datum predaje rada: Predviđeni datumi obrane:  
30. rujna 2021. 2. prosinca 2021. 13. – 17. prosinca 2021.

Zadatak zadao: Predsjednik Povjerenstva:  
  
Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatipović   
Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatipović

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. UVOD.....	1
1.1. Pregled literature .....	2
2. GIBANJE BRODA NA VALOVIMA .....	4
2.1. Morski valovi .....	4
2.2. Spektri energije morskih valova .....	6
2.2.1. JONSWAP spektar.....	6
2.3. Njihanje broda na valovima .....	8
2.4. Odziv broda na valovima .....	11
3. OPIS PROGRAMA <i>d3v-gsd</i> .....	12
3.1. Opis analitičke forme .....	12
3.2. Opis programa HydroSTAR .....	16
3.3. Opis programskog modula Hydrostar .....	17
2.3.1. Algoritam za generiranje mreže četverokutnih panela .....	17
2.3.2. Procedura proračuna njihanja broda na valovima .....	19
2.3.3. Korisničko sučelje modula Hydrostar .....	21
4. ANALIZA UTJECAJA PARAMETARA.....	23
4.1. Robusna metoda .....	23
4.2. Analiza utjecaja varijacije duljine broda $L_{pp}$ .....	25
4.3. Analiza utjecaja varijacije širine broda $B_m$ .....	28
4.4. Analiza utjecaja varijacije gaza broda $D$ .....	31
4.5. Analiza utjecaja varijacije punoće gl. rebra $MS_{full}$ .....	34
4.6. Analiza utjecaja varijacije punoće krme $AFT_{full}$ .....	37
4.8. Analiza utjecaja varijacije punoće krmenog zrcala $TR_{full}$ .....	40
4.7. Analiza utjecaja varijacije punoće pramca $FWD_{full}$ .....	43
4.9. Analiza utjecaja varijacije širine krmenog zrcala $TB$ .....	46
4.10. Analiza utjecaja varijacije visine krmenog zrcala $TD$ .....	49
4.11. Analiza utjecaja varijacije pozicije pramca $FWK$ .....	52
4.12. Analiza utjecaja varijacije pozicije krme $ACU$ .....	55
5. ZAKLJUČAK.....	58
LITERATURA.....	59
PRILOG .....	60

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Morski val [6].....	4
Slika 2.	JONSWAP spekter za $H_S=1.8m$ .....	7
Slika 3.	Stupnjevi slobode gibanja broda .....	9
Slika 4.	Krivulje koje opisuju konture vodnih linija analitičke forme [10].....	13
Slika 5.	Prikaz vodnih generiranih linija analitičke forme .....	14
Slika 6.	Parametri glavnih i karakterističnih dimenzija analitičke forme.....	14
Slika 7.	Triangularizirana analitička parametarska forma broda.....	15
Slika 8.	Shema programa HydroSTAR [10].....	16
Slika 9.	Algoritam za generiranje mreže kvadri-lateralnih panela .....	18
Slika 10.	Četverokutna mreža analitičke parametarske forme .....	19
Slika 11.	Dijagram toka procedure proračuna njihanja broda na valovima .....	21
Slika 12.	Korisničko sučelje programskog modula <i>Hydrostar</i> .....	22
Slika 13.	Dijagram toka robusne metoda.....	24
Slika 14.	Utjecaj $L_{pp}$ na RAO ljuljanja $\eta_4$ .....	25
Slika 15.	Utjecaj $L_{pp}$ na RAO posrtanja $\eta_5$ .....	25
Slika 16.	Utjecaj duljine $L_{pp}$ (m) na ljuljanje $R_{S,\eta_4}$ .....	26
Slika 17.	Utjecaj duljine na ljuljanje $R_{S,\eta_4}$ u odnosu na volumen istisnine $V$ ( $m^3$ ) .....	26
Slika 18.	Utjecaj duljine $L_{pp}$ (m) na posrtanje $R_{S,\eta_5}$ .....	27
Slika 19.	Utjecaj duljine na posrtanje $R_{S,\eta_5}$ u odnosu na volumenu istisnine $V$ ( $m^3$ ).....	27
Slika 20.	Utjecaj $B_m$ na RAO ljuljanja $\eta_4$ .....	28
Slika 21.	Utjecaj $B_m$ na RAO posrtanja $\eta_5$ .....	28
Slika 22.	Utjecaj širine $B_m$ (m) na ljuljanje $R_{S,\eta_4}$ .....	29
Slika 23.	Utjecaj širine na ljuljanje $R_{S,\eta_4}$ u odnosu na volumen istisnine $V$ ( $m^3$ ).....	29
Slika 24.	Utjecaj širine $B_m$ (m) na posrtanje $R_{S,\eta_5}$ .....	30
Slika 25.	Utjecaj širine na posrtanje $R_{S,\eta_5}$ u odnosu na volumenu istisnine $V$ ( $m^3$ ).....	30
Slika 26.	Utjecaj $D$ na RAO ljuljanja $\eta_4$ .....	31
Slika 27.	Utjecaj $D$ na RAO posrtanja $\eta_5$ .....	31
Slika 28.	Utjecaj gaza $D$ (m) na ljuljanje $R_{S,\eta_4}$ .....	32
Slika 29.	Utjecaj gaza na ljuljanje $R_{S,\eta_4}$ u odnosu na volumen istisnine $V$ ( $m^3$ ) .....	32
Slika 30.	Utjecaj gaza $D$ (m) na posrtanje $R_{S,\eta_5}$ .....	33
Slika 31.	Utjecaj gaza na posrtanje $R_{S,\eta_5}$ u odnosu na volumenu istisnine $V$ ( $m^3$ ).....	33
Slika 32.	Utjecaj $MS_{full}$ na RAO ljuljanja $\eta_4$ .....	34
Slika 33.	Utjecaj $MS_{full}$ na RAO posrtanja $\eta_5$ .....	34
Slika 34.	Utjecaj punoće gl. rebra $MS_{full}$ na ljuljanje $R_{S,\eta_4}$ .....	35
Slika 35.	Utjecaj punoće gl. rebra $MS_{full}$ na ljuljanje $R_{S,\eta_4}$ u odnosu na volumen istisnine $V$ ( $m^3$ ).....	35
Slika 36.	Utjecaj punoće gl. rebra $MS_{full}$ na posrtanje $R_{S,\eta_5}$ .....	36

Slika 37. Utjecaj punoće gl. rebra $MS_{full}$ na posrtanje $R_{S,\eta_5}$ u odnosu na volumen istisnine $V$ ( $m^3$ ).....	36
Slika 38. Utjecaj $AFT_{full}$ na RAO ljuljanja $\eta_4$ .....	37
Slika 39. Utjecaj $AFT_{full}$ na RAO posrtanja $\eta_5$ .....	37
Slika 40. Utjecaj punoće krme $AFT_{full}$ na ljuljanje $R_{S,\eta_4}$ .....	38
Slika 41. Utjecaj punoće krme $AFT_{full}$ na ljuljanje $R_{S,\eta_4}$ u odnosu na volumen istisnine $V$ ( $m^3$ ) .....	38
Slika 42. Utjecaj punoće krme $AFT_{full}$ na posrtanje $R_{S,\eta_5}$ .....	39
Slika 43. Utjecaj punoće krme $AFT_{full}$ na posrtanje $R_{S,\eta_5}$ u odnosu na volumen istisnine $V$ ( $m^3$ ) .....	39
Slika 44. Utjecaj $TR_{full}$ na RAO ljuljanja $\eta_4$ .....	40
Slika 45. Utjecaj $TR_{full}$ na RAO posrtanja $\eta_5$ .....	40
Slika 46. Utjecaj punoće zrcala $TR_{full}$ na ljuljanje $R_{S,\eta_4}$ .....	41
Slika 47. Utjecaj punoće zrcala $TR_{full}$ na ljuljanje $R_{S,\eta_4}$ u odnosu na volumen istisnine $V$ ( $m^3$ ) .....	41
Slika 48. Utjecaj punoće zrcala $TR_{full}$ na posrtanje $R_{S,\eta_5}$ .....	42
Slika 49. Utjecaj punoće zrcala $TR_{full}$ na posrtanje $R_{S,\eta_5}$ u odnosu na volumen istisnine $V$ ( $m^3$ ) .....	42
Slika 50. Utjecaj $FWD_{full}$ na RAO ljuljanja $\eta_4$ .....	43
Slika 51. Utjecaj $FWD_{full}$ na RAO posrtanja $\eta_5$ .....	43
Slika 52. Utjecaj punoće pramca $FWD_{full}$ na ljuljanje $R_{S,\eta_4}$ .....	44
Slika 53. Utjecaj punoće pramca $FWD_{full}$ na ljuljanje $R_{S,\eta_4}$ u odnosu na volumen istisnine $V$ ( $m^3$ ).....	44
Slika 54. Utjecaj punoće pramca $FWD_{full}$ na posrtanje $R_{S,\eta_5}$ .....	45
Slika 55. Utjecaj punoće pramca $FWD_{full}$ na posrtanje $R_{S,\eta_5}$ u odnosu na volumen istisnine $V$ ( $m^3$ ).....	45
Slika 56. Utjecaj $TB$ na RAO ljuljanja $\eta_4$ .....	46
Slika 57. Utjecaj $TB$ na RAO posrtanja $\eta_5$ .....	46
Slika 58. Utjecaj širine zrcala $TB$ na ljuljanje $R_{S,\eta_4}$ .....	47
Slika 59. Utjecaj širine zrcala $TB$ na ljuljanje $R_{S,\eta_4}$ u odnosu na volumen istisnine $V$ ( $m^3$ ) ....	47
Slika 60. Utjecaj širine zrcala $TB$ na posrtanje $R_{S,\eta_5}$ .....	48
Slika 61. Utjecaj širine zrcala $TB$ na posrtanje $R_{S,\eta_5}$ u odnosu na volumen istisnine $V$ ( $m^3$ )... ..	48
Slika 62. Utjecaj $TD$ na RAO ljuljanja $\eta_4$ .....	49
Slika 63. Utjecaj $TD$ na RAO posrtanja $\eta_5$ .....	49
Slika 64. Utjecaj visine zrcala $TD$ na ljuljanje $R_{S,\eta_4}$ .....	50
Slika 65. Utjecaj visine zrcala $TD$ na ljuljanje $R_{S,\eta_4}$ u odnosu na volumen istisnine $V$ ( $m^3$ ) ... ..	50
Slika 66. Utjecaj visine zrcala $TD$ na posrtanje $R_{S,\eta_5}$ .....	51



Slika 67. Utjecaj visine zrcala <i>TD</i> na posrtanje $R_{S,\eta_4}$ u odnosu na volumen istisnine $V$ (m <sup>3</sup> )..	51
Slika 68. Utjecaj <i>FWK</i> na RAO ljuljanja $\eta_4$ .....	52
Slika 69. Utjecaj <i>FWK</i> na RAO posrtanja $\eta_5$ .....	52
Slika 70. Utjecaj pozicije pramca <i>FWK</i> na ljuljanje $R_{S,\eta_4}$ .....	53
Slika 71. Utjecaj pozicije pramca <i>FWK</i> na ljuljanje $R_{S,\eta_4}$ u odnosu na volumen istisnine $V$ (m <sup>3</sup> ).....	53
Slika 72. Utjecaj pozicije pramca <i>FWK</i> na posrtanje $R_{S,\eta_5}$ .....	54
Slika 73. Utjecaj pozicije pramca <i>FWK</i> na posrtanje $R_{S,\eta_5}$ u odnosu na volumen istisnine $V$ (m <sup>3</sup> ).....	54
Slika 74. Utjecaj <i>ACU</i> na RAO ljuljanja $\eta_4$ .....	55
Slika 75. Utjecaj <i>ACU</i> na RAO posrtanja $\eta_5$ .....	55
Slika 76. Utjecaj pozicije krme <i>ACU</i> na ljuljanje $R_{S,\eta_4}$ .....	56
Slika 77. Utjecaj pozicije krme <i>ACU</i> na ljuljanje $R_{S,\eta_4}$ u odnosu na volumen istisnine $V$ (m <sup>3</sup> ) .....	56
Slika 78. Utjecaj pozicije krme <i>ACU</i> na posrtanje $R_{S,\eta_5}$ .....	57
Slika 79. Utjecaj pozicije krme <i>ACU</i> na posrtanje $R_{S,\eta_5}$ u odnosu na volumen istisnine $V$ (m <sup>3</sup> ) .....	57

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Karakteristike odabranog valnog spektra ..... 7  
Tablica 2. Parametri analitičke forme ..... 13  
Tablica 3. Parametri inicijalne forme broda ..... 23

---

**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
$ACU$		koeficijent pozicije krme
$a_i$	m	amplituda kosinus komponente harmonijskog vala
$A_{jk}$		oddatna masa u smjeru $k$ uslijed njihanja $j$
$b_i$	m	amplituda sinus komponente harmonijskog vala
$B_{jk}$		koef. prigušenja u smjeru $k$ uslijed njihanja $j$
$B_m$	m	širina broda
$AFT_{full}$		koeficijent punoće krme
$C_{jk}$		hidrostatički povratni koef. u smjeru $k$ uslijed njihanja $j$
$d$	m	dubina vode
$D$	m	gaz broda
$F_j$		hidrodinamička uzbudna sila
$FWD_{full}$		koeficijent punoće pramca
$FWK$		koeficijent pozicije pramca
$g$	$ms^{-2}$	gravitacijsko ubrzanje
$H$	m	visina vala
$H_S$ ili $H_{1/3}$	m	značajna visina vala
$k$	$rad\ m^{-1}$	valni broj
$L_{pp}$	m	duljina broda
$M$	kg	masa broda
$m_0$	$m^2$	nulti moment spektra,
$m_n$	$m^2\ s^{-n}$	n-ti moment spektra
$MS_{full}$		koeficijent punoće glavnog rebra
$R_a$		amplituda odziva operator amplitude odziva (eng. <i>response amplitude operator</i> )
$RAO$	-	
$S_R$	-	spektar odziva
$S_\zeta$ ili $S_w$	$m^2s^{-1}$	spektar valova
$TB$		koeficijent širine krmenog zrcala
$TD$		koeficijent visine krmenog zrcala
$T_p$	s	vršni valni period
$TR_{full}$		koeficijent punoće krmenog zrcala
$T_z$	s	nulti valni period
$\gamma$		parametar odnosa maksimalnih spektralnih energija
$\varepsilon$	rad	fazni pomak
$\zeta$	m	elevacija vala
$\zeta_{sr}$	m	srednja vrijednost elevacije vala
$\zeta_{1/3}$	m	značajna amplituda elevacije vala

---

$\zeta_a$	m	amplituda elevacija vala
$\zeta_{ai}$	m	amplituda harmonijske komponente vala
$\eta_{ai}$	m	amplituda i-tog oblika njihanja ( $i=1 \dots 3$ )
$\eta_{ai}$	rad	amplituda i-tog oblika njihanja ( $i=4 \dots 6$ )
$\eta_i$		i-ti oblik njihanja ( $i=1 \dots 6$ )
$\lambda$	m	valna duljina
$\lambda_p$	m	vršna valna duljina
$\lambda_z$	m	nulta valna duljina
$\rho$	kg m <sup>-3</sup>	gustoća
$\sigma$		standardna devijacija
$\sigma_\zeta$		standardna devijacija amplitude vala
$\Phi_0$	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	potencijal nailaznog vala
$\Phi_7$	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	difrakciji potencijal
$\Phi_j$	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	radijacijski potencijal
$\omega$	rad s <sup>-1</sup>	frekvencija vala
$\omega_e$	rad s <sup>-2</sup>	susretna frekvencija vala

---

**SAŽETAK**

Sve veći zahtjevi postavljaju se pred inženjere brodogradnje s obzirom na udobnost putnika i posade, odnosno njihanja broda na valovitom moru, prema tome pomorstvenost postaje važan kriterij pri određivanju forme broda. Osobito je važno u ranim fazama projektiranja moći odrediti karakteristike forme zbog čega se u praksi nalazi sve veća primjena i razvoj računalnih alata za procjenu hidrodinamičkih karakteristika forme.

U ovome radu razvijen je programski modul *Hydrostar* unutar programa otvorenog koda *d3v-gsd* koji omogućuje korisniku automatiziranu pripremu ulaznih podataka za program HydroSTAR (Bureau Veritas) za analitički zadanu parametarsku formu, te provedbu proračuna pomorstvenosti. Rad programskog modula *Hydrostar* prikazan je i opisan dijagramima toka. Zadanu analitičku formu moguće je modificirati varijacijom 11 različitih parametara ( $L_{pp}$ ,  $B_m$ ,  $D$ ,  $MS_{full}$ ,  $AFT_{full}$ ,  $FWD_{full}$ ,  $TR_{full}$ ,  $TB$ ,  $TD$ ,  $FWK$ ,  $ACU$ ). Na temelju razvijenog alata provedena je analiza utjecaja parametara na odzive ljuljanja i posrtanja, čiji su rezultati prikazani.

Ključne riječi: pomorstvenost, analitička forma, CAD, HydroSTAR, analiza utjecaja parametara forme

---

**SUMMARY**

Naval architects are confronted with more demanding requirements for crew and passenger comfort, respectively ship motions in sea environment, so seakeeping performance is becoming important criteria in the process of hull form design. It is especially important to estimate hull form characteristics in the early stages of the design process, which is the reason of more frequent use and development of the computer tools for estimating hydrodynamic characteristics of hull form in the naval architecture practice.

This paper represents the description of the program module *Hydrostar*, that is developed in the open source program *d3v-gsd*, which enables automatic generation of input files for seakeeping software HydroSTAR (Burea Veritas) and seakeeping calculation for the analytic parametric hull form. The analytic hull form can be modified by variation of 11 different parameters ( $L_{pp}$ ,  $B_m$ ,  $D$ ,  $MS_{full}$ ,  $AFT_{full}$ ,  $FWD_{full}$ ,  $TR_{full}$ ,  $TB$ ,  $TD$ ,  $FWK$ ,  $ACU$ ). Effect of hull form parameters on roll and pitch motions analysis is conducted with developed tool and results are shown, respectively.

Key words: seakeeping, analytic hull form, CAD, HydroSTAR, effect of hull form parameters analysis

## 1. UVOD

Veliki trgovački brodovi namijenjeni su za preoceansku plovidbu. Kako bi bili u stanju izvršiti svoju misiju, moraju biti otporni na uvijete plovidbe koji su određeni morskim okolišem: vjetar, valovi i morske struje. Sveukupna gibanja broda na valovima nazivamo pomorstvenost (eng. *seakeeping*) koja opisuje dinamiku gibanja broda na valovitom moru.

Svaki brod na morskim valovima ima šest stupnjeva slobode gibanja, tri translatorna i tri rotacijska. Određivanjem ovih gibanja, bilo analitički ili numerički, moguće je postaviti projektne kriterije u ranim fazama projektiranja broda, kada projektant još ima najveću slobodu da ih definira. Na ponašanje broda na valovima bitno utječe brodska forma.

Prema tome, ako govorimo o optimizaciji brodske forme, jedan od važnih kriterija bit će pomorstvenost, osobito kod ratnih brodova, zbog taktičkih zadataka, te putničkih brodova, zbog udobnosti tokom vožnje. Optimizacija korištenjem računalnih alata, razvila se u važnu granu tehničkih i inženjerskih znanosti. Ova grana znanosti našla je svoju primjenu u brodograđevnoj industriji za optimizaciju brodske forme, korištenjem numeričkih metoda za rješavanje jednadžbi potencijalnog strujanja, RANS (eng. *Reynolds-averaged Navier–Stokes equations*) i dr. u usporedbi s eksperimentalnim ispitivanjima modela broda i broda u naravi.

Analitičko zadavanje forme broda ima široku primjenu u ranim fazama projektiranja broda jer omogućuje jednostavno modificiranje forme broda putem promjene manjeg broja parametara. Uključivanje analize parametara brodske forme u automatizirani proces optimizacije moguće je ostvariti jedino ako je dostupan moćan (računalni) alat za parametarsko modeliranje brodske forme.

U ovome radu, proširenjem funkcionalnosti programa otvorenog koda *d3v-gsd* (programski jezik Python), omogućena je automatizirana priprema ulaznih podataka za proračun pomorstvenosti u programu HydroSTAR (Bureau Veritas) za analitički zadanu formu. Na temelju razvijenog računalnog alata provedena je analiza utjecaja pojedinih parametara analitički zadane forme broda na odzive ljuljanja i posrtanja.

## 1.1. Pregled literature

Utjecajem značajki i parametara forme broda na svojstva pomorstvenosti, kao i razvojem metoda za optimizaciju brodske forme bavili su se mnogi brodograđevni znanstvenici.

Grigoropoulos i Chalkias [1] su koristili parametarsku formu broda za generiranje različitih varijanti brodske forme, promjenom određenih parametara, koje su potom ocjenjene u procesu optimizacije baziranom na evolucijskim algoritmima. Oni predlažu, u slučajevima brzih deplasmanskih formi, gdje postoje dvije nezavisne grupe parametara za brodsku formu i bulb, da se optimizacija provede u dvije faze. Također upozoravaju na ograničenja parametara, koja je potrebna postaviti prilikom generiranja varijacija forme, kako se ne bi dobile forme broda koje nisu geometrijski prihvatljive ili usklađene s ostatkom projekta.

Sarioz [2] je predstavio metodu projektiranja optimalne forme broda, s obzirom na kriterije pomorstvenosti, korištenjem optimizacijske metode. Pokazao je da postoji kompleksna veza između svojstava pomorstvenosti i značajki brodske forme. Unatoč kompleksnosti, moguće je jednostavno pronaći optimalno rješenje brodske forme, ako se projektantu omogući da postavi granične funkcije i ciljeve optimizacije.

Parametarska studija [3] provedena je s ciljem ispitivanja utjecaja promjene glavnih dimenzija ( $L_{pp}$ ,  $B_m$ ,  $T$ ) i koeficijenata brodske forme ( $C_p$  i  $LCB$ ) na ponašanje broda na valovima. Varijante brodskih formi, generirane su mijenjajući značajke početne brodske forme, a podijeljene su u dvije grupe: prva grupa su brodske forme sistematično generirane mijenjajući glavne dimenzije, a druga grupa su forme generirane mijenjajući koeficijente brodske forme. Iz rezultata se može zaključiti kako smanjenje duljine smanjuje amplitude poniranja, ali povećava amplitude posrtanja, dok se povećanje omjera širine i gaza smanjuje gibanja u vertikalnoj ravnini (poniranje, valjanje, posrtanje).

Još jednu parametarsku studiju utjecaja koeficijenta površine vodne linije ( $CWP$ ) na stopu poboljšanja pomorstvenosti, proveli su Babadi i Ghassemi [4], na primjeru korvete. Korišten je neizraženi model (eng. *fuzzy model*) za modeliranje vodnih linija, koji mijenja koeficijent površine vodne linije ( $C_{wp}$ ) dok ostale geometrijske značajke drži konstantnima ( $C_p$ ,  $C_b$ ,  $C_m$  i  $B$ ). Ova metoda je ograničena jer može optimizirati samo jednu značajku, prema tome može biti korisna uz pretpostavku da su ostale značajke forme već optimirane.

U drugom radu, Babadi i Ghassemi [5], proveli su ispitivanje utjecaja koeficijenata brodske forme na ponašanje broda na valovima, na primjeru brzog broda sa zgibovima. Prikazali su utjecaj promjene koeficijenata vodne linije ( $C_{wp}$ ) i prizmatičkog koeficijenta ( $C_p$ ), na



---

hidrodinamički odziv na valovima, koji je izračunat korištenjem vrpčaste metode i Pierson-Moskowitz (PM) valnog spektra. Zaključeno je da povećanje i smanjenje  $C_{wp}$  u valjanju potpuno povezano s relativnom frekvencijom i ne može biti razmatrana neovisno o njoj. Također, autori zaključuju, da postoji proporcionalna veza između amplitude valjanja i koeficijenta vodne linije ( $C_{wp}$ ).

## 2. GIBANJE BRODA NA VALOVIMA

### 2.1. Morski valovi

Morski valovi djeluju na trup broda hidrodinamičkim silama koje uzrokuju njihanje broda. Sa stanovišta projektiranja broda, značajni su gravitacijski valovi uzrokovani vjetrom, zato što imaju valni period od 1 do 25 sekundi te su osnovni uzroci smetnji, opasnosti i štete [6]. Složena priroda morskih valova opisuje se kao suma harmonijskih valova različitih amplituda (princip superpozicije). Linearna teorija valova uključuje temeljne jednačbe strujanja fluida, rubne uvijete teorije gravitacijskog (harmonijskog) vala te potencijalno strujanje fluida iz čega se izvode osnovna fizikalna svojstva i zakonitosti gibanja izdvojenog vala. Osnovna jednačba harmonijskog ravninskog vala izvodi se iz rubnih uvjeta, a naziva se disperzivna jednačba:

$$\omega^2 = kg \cdot \tanh(kd) \quad (1)$$

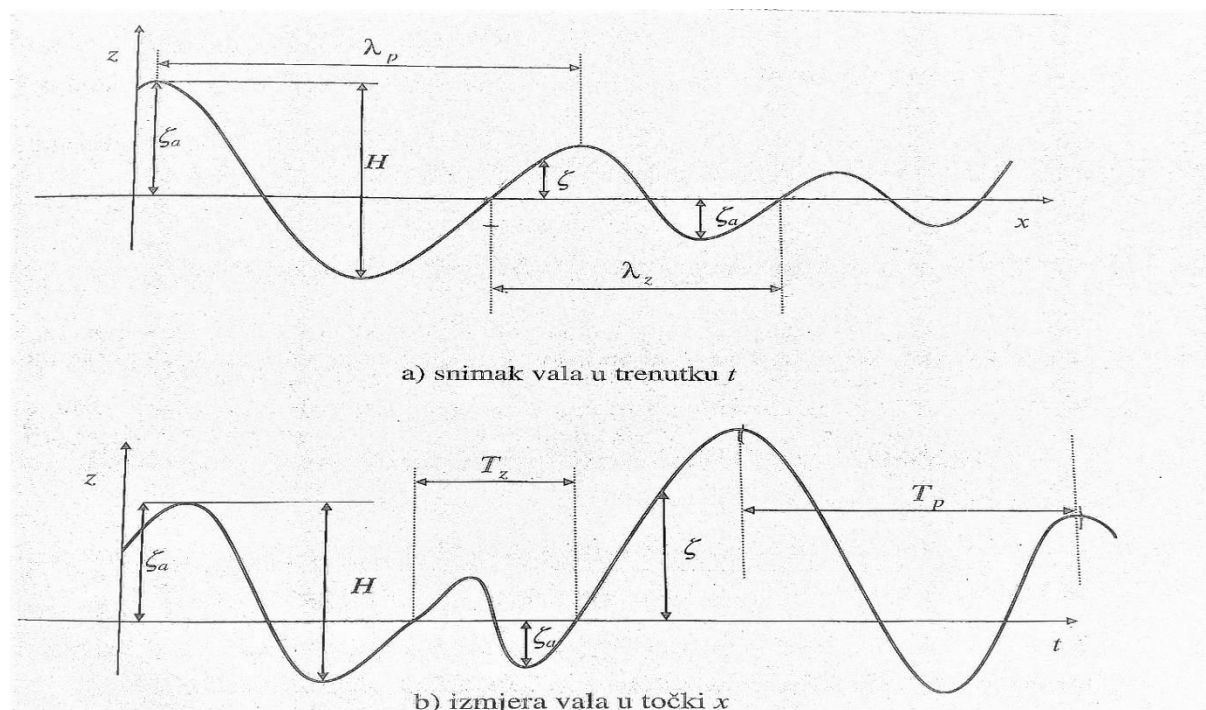
gdje je:

$\omega$  - frekvencija vala, rad s<sup>-1</sup>

$k$  - valni broj, rad m<sup>-1</sup>

$d$  - dubina vode, m

Slika 1. prikazuje snimak morskog vala u zadanom trenutku, odnosno izmjeru elevacije vala u određenoj točki tijekom vremenskog perioda.



Slika 1. Morski val [6]

Oznake na slici označuju karakteristike morskog vala:

$H$  - valna visina, m

$\zeta_a$  - valna amplituda, m

$\lambda_p$  - vršna valna duljina, m

$\lambda_z$  - nulta valna duljina, m

$T_p$  - vršni period vala, s

$T_z$  - nulti period vala, s

Elevacija morskog vala mjeri se u određenoj točki valnog područja u realnom vremenu. Iz tog mjerenja nastaje histogram elevacije vala. Na temelju dobivenog histograma računaju se statističke mjere kojima se opisuje stanje mora. Stanje mora smatra se homogeno i stacionarno, ako su dobivene statističke mjere iste, neovisno o vremenu i prostoru kada je snimka napravljena. Svojstvo homogenosti i stacionarnosti stanja mora važno je zato da bi se proces morskih valova mogao nazvati ergodičkim. Analizom histograma elevacije definiraju se sljedeće statističke mjere kojima se opisuje valni profil:

- Srednja vrijednost amplituda valova:

$$\bar{\zeta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \zeta_i \quad (2)$$

- Varijanca amplituda valova:

$$m_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\zeta_i - \bar{\zeta})^2 \quad (3)$$

- Standardna devijacija amplituda valova:

$$\sigma = \sqrt{m_0} \quad (4)$$

- Značajna valna amplituda:

$$\zeta_{1/3} = \frac{H_{1/3}}{2} = \frac{3}{N_a} \sum_{j=\frac{2}{3}N_a}^{N_a} \zeta_{aj} = 2\sigma \quad (5)$$

Nadalje, kako je već rečeno svaki se morski val može prikazati kao superpozicija niza harmonijskih valova, slijedi da se svaki zapis morskog vala, na nekom mjestu ostvaren u vremenu  $t$ , može prikazati Fourier-ovim redom:

$$\zeta(t) = \bar{\zeta} + \sum_{i=1}^N (a_i \cos \omega_i t + b_i \sin \omega_i t) \quad (6)$$

ili

$$\zeta(t) = \bar{\zeta} + \sum_{i=1}^N \zeta_{ai} \cos(\omega_i t + \varepsilon_i) \quad (7)$$

## 2.2. Spektri energije morskih valova

Morski val opisan Fourier-ovim redom (6) i (7), može se opisati jednostavnom funkcijom, koja u sebi sadrži sve sadrži vrijednosti kvadrata amplitude za određenu frekvenciju.

Poznato je da je energija vala proporcionalna kvadratu amplitude, prema tome ta funkcija naziva se spektar energije valova ili skraćeno spektar valova. Varijanca amplituda valova predstavlja srednju vrijednost kvadrata amplituda  $\sigma_\zeta^2$ , a ona je definirana sljedećim izrazima:

$$\begin{aligned} \sigma_\zeta^2 &= \overline{\zeta^2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \zeta_i^2 = \frac{1}{N\Delta t} \sum_{i=1}^N \zeta_i^2 \Delta t \\ &= \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \zeta^2(t) dt = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \left\{ \sum_{i=1}^N \zeta_{ai} \cos(\omega_i t - k_i x - \varepsilon_i) \right\}^2 dt \\ &= \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \zeta_{ai}^2 \end{aligned} \quad (8)$$

Spektar energije valova definira je na sljedeći način:

$$S_\zeta(\omega_i) \Delta\omega = \sum_{\omega_i}^{\omega_i + \Delta\omega} \frac{1}{2} \zeta_{ai}^2(\omega) \quad (9)$$

Ako  $\Delta\omega \rightarrow 0$ , spektar valova, pretvara se u kontinuiranu funkciju:

$$S_\zeta(\omega_i) d\omega = \frac{1}{2} \zeta_{ai}^2(\omega) \quad (10)$$

Iz same definicije spektralne funkcije slijedi da se varijanca amplituda valova računa kao integral površina ispod krivulje spektra:

$$\sigma_\zeta^2 = \int_0^\infty S_\zeta(\omega_i) d\omega \quad (11)$$

Spektar gustoće energije valova određuje se eksperimentalnim ispitivanjem elevacije vala u određenoj točki mora u realnom vremenu, a tako dobiveni spektar ima ograničenu upotrebu na mjereno morsko područje ili morska područja za koja se pretpostavlja sličnih karakteristika. U praksi se koristi skupina idealnih spektara, koji definirani teorijskim formulama, vrijede za otvorena i zatvorena mora [6].

U ovome radu korišten je JONSWAP spektar valova unutar analize utjecaja parametara forme na odzive ljuljanja i posrtanja

### 2.2.1. JONSWAP spektar

JONSWAP spektar (Joint North Sea Wave Project, 1986.) je unimodalan (ima samo jedan ekstrem) i opisuje karakteristike valova u ograničenom akvatoriju. JONSWAP spektar definiran je kako slijedi [6]:

$$S_{\zeta}^J(\omega) = 0.658 \frac{A}{\omega^5} e^{\left(-\frac{B}{\omega^4}\right)} \gamma^{\left(\frac{(\omega-\omega_m)^2}{2\sigma^2\omega_m^2}\right)} \quad (12)$$

$$A = \frac{173H_{1/3}}{T^4}$$

$$B = \frac{-692}{T^4}$$

Prosječne vrijednosti eksperimentalnih podataka za JONSWAP spektar iznose [7]:

$$\gamma = 3.3$$

$$\sigma_a = 0.7$$

$$\sigma_b = 0.9$$

Prema DNV-im uputama za okolišne uvijete [7], JONSWAP spektar je razumno koristiti za:

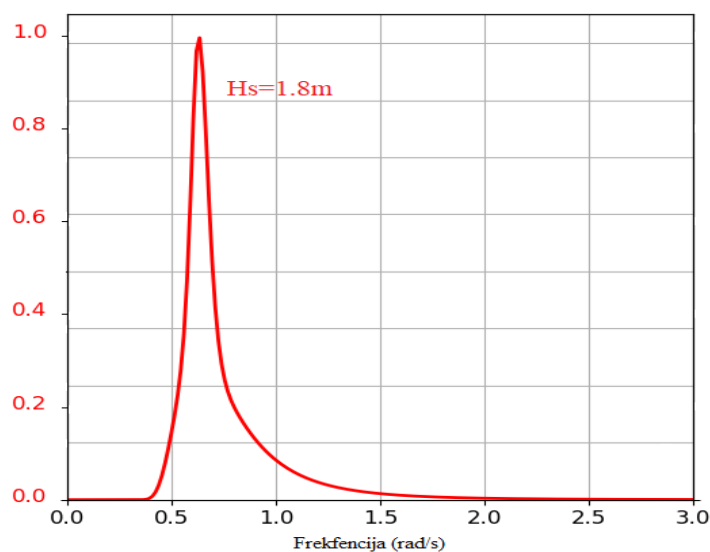
$$3.6 < \frac{T_p}{H_s} < 5 \quad (13)$$

U ovome radu odabran je JONSWAP valni spektar, u okviru analize utjecaja promjene parametara na odzive ljuljanja i posrtanja, čije su karakteristike prikazane u Tablica 1., a prikazan je na Slika 2.

**Tablica 1. Karakteristike odabranog valnog spektra**

Tip	JONSWAP
$H_s$ , m	1,80
$T_p$ , s	4,93
$\gamma$	3.3

JONSWAP spektar



**Slika 2. JONSWAP spektar za  $H_s=1.8m$**

### 2.3. Njihanje broda na valovima

Na brod koji pluta na slobodnoj površini nailazi val, koji dio svoje energije predaje trupu brodu. Ta energija pretvara se u energiju njihanja, dok se deformacije trupa zanemaruju. Brod se počinje oscilatorno gibati te emitirati energiju koja se radijalno širi u svim horizontalnim smjerovima. Nailazni val nakon što je predao dio energije trupu broda nastavlja napredovati, uz istu valnu duljinu i period, ali smanjenu valnu visinu, što se naziva difrakcija ili lom vala. Energija njihanja jednaka je razlici energije vala prije i nakon sudara s trupom broda (difrakcijski val), a dijeli se na sljedeće komponente:

- Energija inercijskih sila mase
- Energija uslijed rada povratnih sila (nastalih pomakom tijela iz ravnotežnog položaja)
- Energija valova radijacije

Energija radijacijskih valova vrlo je značajna u modelu njihanja broda, jer se ona očituje kao prigušivanje oscilatornih gibanja te povećanje mase tijela prilikom njihanja.

U složeni mehanizam interakcije vala i trupa broda potrebno je uvesti određene pretpostavke i pojednostavljena kako bi se s dovoljnom inženjerskom točnošću mogla procijeniti njihanja i dinamička opterećenja broda. Osnovna pretpostavka je da su valna uzbuda i odziv broda linearno zavisni, te je moguće principom superpozicije razlučiti pojedine sile i momente. Ta pretpostavka dovoljno je dobra ako se razmatraju male valne amplitude odnosno male amplitude njihanja. Nalazni val opisuje se kao harmonijski progresivni val, odnosno spektar harmonijskih progresivnih valova (morski val), a uz to idu već opisane pretpostavke (vidi 2.1.). Ako je odnos dimenzija trupa i vala istog reda veličine, to znači da pojave difrakcije i radijacije dominiraju u modelu njihanja. Prema tome interakcija trupa broda i vala može se analizirati u dva koraka. U prvom se opisuje model strujanja nepomičnog tijela koje nastaje uslijed nailazećeg vala i njegove difrakcije. Strujanje oko trupa u modelu nepomičnog tijela jednako je zbroju potencijala brzine strujanja nailaznog vala i potencijala difrakcijskog vala. U drugom koraku razmatra se njihanje tijela u mirnoj tekućini, bez prisutnosti nailazećeg vala. Strujanje oko uronjenog dijela trupa opisano je funkcijama potencijala brzine strujanja radijacijskih valova. Iz toga slijedi da je ukupan potencijal strujanja u modelu njihanja broda na valovima određen sljedećom superpozicijom:

$$\Phi(x, y, z, ;t) = \Phi_0(x, y, z, ;t) + \sum_{j=1}^6 \Phi_j(x, y, z, ;t) + \Phi_7(x, y, z, ;t) \quad (15)$$

gdje je:

$\Phi_0(x, y, z, ;t)$  - potencijal strujanja nailaznog vala (prije difrakcije)

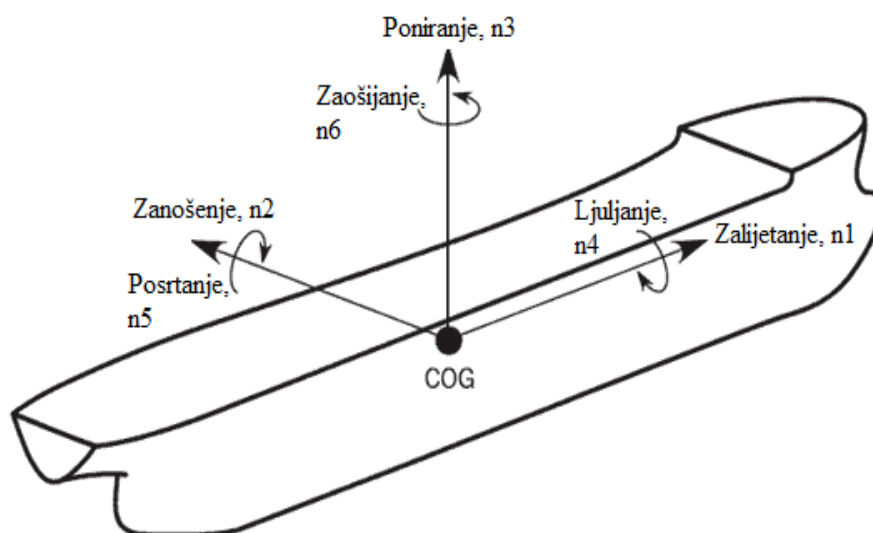
$\sum_{j=1}^6 \Phi_j(x, y, z, ;t)$  - potencijal strujanja radijacijskog vala

$\Phi_7(x, y, z, ;t)$  - potencijal strujanja difrakcijskog vala

U prvom modelu integracijom tlakova na oplakanoj površini određuje se uzbudna sila i moment kojima nailazeći val djeluje na tijelo. U drugom modelu, kao posljedica njihovanja pojavljuju se hidrostatičke i hidrodinamičke sile. Hidrostatičke sile vraćaju tijelo u početno stanje, pa se nazivaju povratnim silama, a hidrodinamičke sile prigušuju nastalo oscilatorno gibanje. Potencijal strujanja određuje se složenim matematičkim i numeričkim postupcima, u brodograđevnoj praksi često je primijenjena vrpčasta metoda.

Nailazni val djeluje na trup broda silama i momentima koji uzrokuju oscilacijsko gibanje trupa u 6 stupnjeva slobode gibanja, Slika 3.:

- zalijetanje (eng. *surge*);  $j=1$
- zanošenje (eng. *sway*);  $j=2$
- poniranje (eng. *heave*);  $j=3$
- ljuljanje (eng. *roll*);  $j=4$
- posrtanje (eng. *pitch*);  $j=5$
- zaošijanje (eng. *yaw*);  $j=6$



**Slika 3. Stupnjevi slobode gibanja broda**

Njihanje broda opisano jednadžbom pomaka i rotacija točke težišta G:

$$\eta_j(t) = \eta_{aj} \cos(\omega_e t + \varepsilon_j); j = 1, \dots, 6 \quad (16)$$

gdje je:

$\eta_{aj}$  - amplituda pomaka točke G (m), odnosno rotacije oko G (rad/m),

$\omega_e$  - susretna frekvencija, rad s<sup>-1</sup>,

$\varepsilon_j$  - fazni pomak u odnosu na nailazeći val, rad.

Poznavanjem pomaka težišta i rotacija oko težišta superpozicijom njihanja, moguće je odrediti gibanja bilo koje točke na brodu, a isto tako i brzine i ubrzanja derivacijama prvog odnosno drugog stupnja. S obzirom na ravninu simetrije broda njihanja se dijele na simetrična ( $\eta_1, \eta_3, \eta_5$ ) i asimetrična ( $\eta_2, \eta_4, \eta_6$ ).

Dinamika njihanja broda na valovima opisuje se sustavom od 6 jednadžbi, koje se temelje na Newtonom drugom zakonu, koja se u matricnom zapisu može izraziti kako slijedi:

$$\left( [M_{jk}] + [A_{jk}] \right) \{ \ddot{\eta}_j \} + [B_{jk}] \{ \dot{\eta}_j \} + [C_{jk}] \{ \eta_j \} = \zeta_a \{ F_j(t) \}; j=1, \dots, 6 \quad (17)$$

gdje je:

$[M_{jk}]$  - matrica masa,

$[A_{jk}]$  - matrica dodane mase,

$[B_{jk}]$  - matrica prigušenja,

$[C_{jk}]$  - matrica povratnih sila,

$\zeta_a$  - jedinična amplituda nailaznog vala,

$F_j(t)$  - hidrodinamička uzbudna sila.



## 2.4. Odziv broda na valovima

Rješavanjem jednadžbe dinamičke ravnoteže njihanja (17) dobije se odziv broda na valovima, kojega je pogodno prikazati prijenosnim funkcijama  $H_{Ra}$ , odnosno operatorom amplitude odziva RAO (eng. *Response Amplitude Operator*), koji prikazuje kvadrat omjera amplitude odziva  $R_a$  i amplitude vala  $\zeta_a$ :

$$RAO = \left| \frac{R_a}{\zeta_a} \right|^2 = H_{Ra}^2 \quad (18)$$

Prijenosne funkcije za translatorne pomake su bezdimenzijske, a jedinice se mogu se shvaćati kao metar amplitude odziva po metru amplitude vala. Dok prijenosne funkcije rotacijskih gibanja nisu bezdimenzijske, jer su izražene u stupnjevima, odnosno radijanima po metru, pa je potrebno, ako njihove prijenosne funkcije potrebno podijeliti s valnim brojem ako se želi dobiti bezdimenzijska veličina.

Prijenosne funkcije određuju se za svaku pojedinu brzinu te susretni kut nailaska valova za zadano stanje mora.

Ako zadano stanje mora opišemo spektrom valova, tada se rješavanjem sustava jednadžbi (17), preko prijenosnih funkcija RAO, može dobiti spektar odziva:

$$S_R(\omega) = RAO^2(\omega)S_w(\omega) \quad (19)$$

Ovo je vrlo važno jer se iz spektra odziva mogu izračunati značajne amplitude odziva  $R_s$ , preko sljedećih izraza:

$$m_{0R} = \int_0^{\infty} S_R(\omega) d\omega \quad (20)$$

$$R_s = 4.00 \sqrt{m_{0R}} \quad (21)$$

### 3. OPIS PROGRAMA *d3v-gsd*

Program *d3v-gsd* (*Design visualizer for General Ship Design*) proširenje je programa *linaetal-fsb/d3v*, koji omogućuje trodimenzijsku (3D) vizualizaciju geometrijskih entiteta te jednostavno definiranje grafičkog sučelja za pojedina namjene. Program je otvorenoga koda razvijen u suradnji prof. Prebega i G. Šikića, a napisan je u programskom jeziku Python. U radu [8] program *d3v-gsd*, proširen je modulom koji učitava i vizualizira parametarsku analitičku formu na temelju triangularizacije, koja je preuzeta sa web-stranice [9].

Unutar ovoga rada, program je proširen modulom *Hydrostar*, koji omogućuje automatiziranu pripremu ulaznih podataka za proračun njihanja u programu HydroSTAR te njegovo izvršavanje, za zadanu parametarsku analitičku formu [9]. Program također omogućuje modifikaciju parametara analitički zadane forme, te vizualizaciju rezultata proračuna. Izrađeno je korisničko sučelje, koje omogućuje korisniku izradu ulaznih datoteka za proračun pomorstvenosti u programu HydroSTAR, provedbu proračuna te vizualizaciju rezultata. Za potrebe analize utjecaja pojedinih parametara analitički zadane forme broda na odabrane mjere kvalitete pomorstvenosti broda na zadanom primjeru, izrađena je metoda koja omogućuje automatsku provedbu analize utjecaja.

#### 3.1. Opis analitičke forme

U ovome radu odabrana analitička forma preuzeta je iz web-aplikacije za parametarsko osnivanje forme broda, koju je razvio Kramel, a temelji se na radu iz 2016. A. S. Piperakisa i H. M. Gaspara [9]. Analitička forma je parametarska i može biti oblikovana promjenom glavnih dimenzija te dodatnim koeficijentima.

Analitička forma definirana je tako da su joj vodne linije, opisane složenom funkcijom koja sadrži kosinus hiperbolne funkcije kako slijedi:

$$y = 1 - \frac{\cosh(xm\pi) - 1}{\cosh(m\pi) - 1} \quad (22)$$

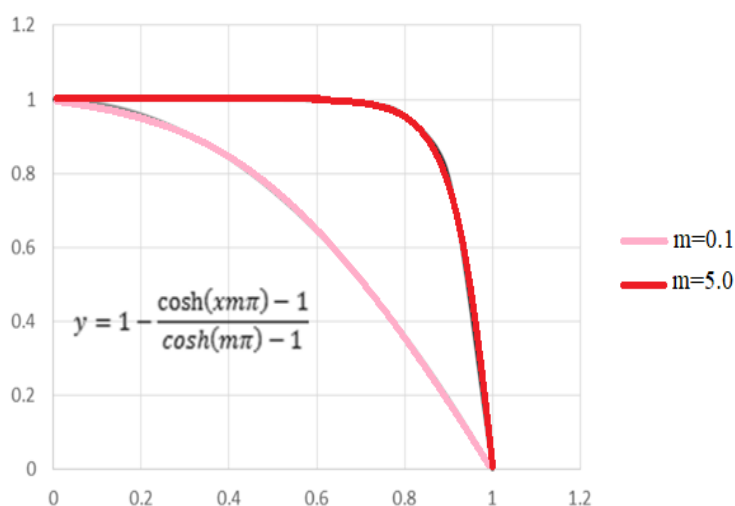
Parametri zadane forme dijele se na glavne dimenzije, a to su: duljina  $L_{pp}$ , širina  $B_m$ , gaz  $D$ , parametre punoće forme: koeficijent punoće glavnog rebra  $MS_{full}$ , koeficijent punoće krme  $AFT_{full}$ , koeficijent punoće pramca  $FWD_{full}$ , koeficijent punoće krmenog zrcala  $TR_{full}$ , te parametre karakterističnih dimenzija: koeficijent širine krmenog zrcala  $TB$ , koeficijent visine krmenog zrcala  $TD$ , koeficijent pozicije kobilice na krmi  $ACU$ , koeficijent pozicije kobilice na pramcu  $FWK$ , a prikazani su na Tablici 2.

Promjenom jednog ili više parametara moguće je generirati modificirane brodske forme, te prilagođavati formu broda prema potrebama projekta. Ovo svojstvo je od jako velikog značenja u inicijalnoj fazi projektiranja u kojoj projektant traži najprikladnije rješenje, zato što projektantu ostavlja fleksibilnost odlučivanja i mogućnost brzog generiranja novih rješenja, ako dođe do promjene u projektu.

**Tablica 2. Parametri analitičke forme**

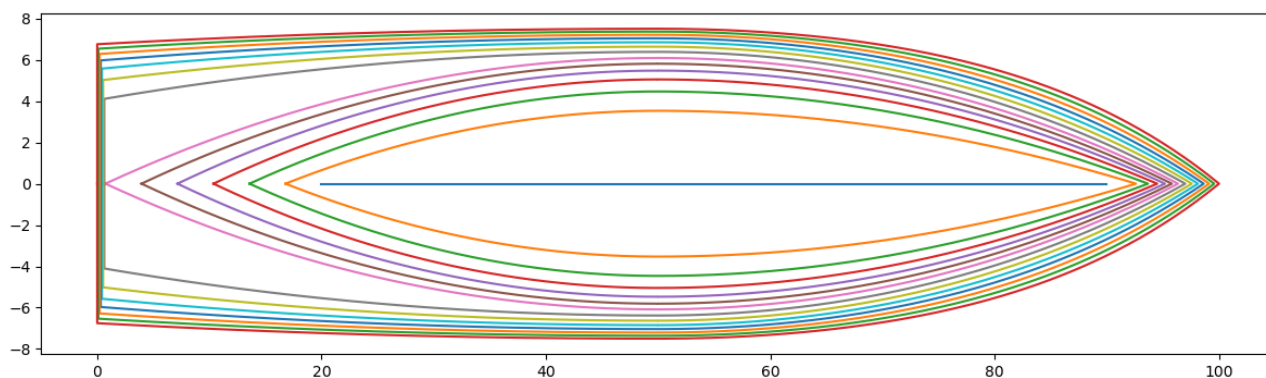
Br.	Naziv	Oznaka	Jedinica
1	Duljina	$L_{pp}$	m
2	Širina	$B_m$	m
3	Gaz	$D$	m
4	Koef. punoće gl. rebra	$MS_{full}$	/
5	Koef. punoće krme	$AFT_{full}$	/
6	Koef. punoće pramca	$FWD_{full}$	/
7	Koef. punoće zrcala	$TR_{full}$	/
8	Koef. širine zrcala	$TB$	m/m
9	Koef. visine zrcala	$TD$	m/m
10	Koef. pozicije kobilice na pramca	$FWK$	m/m
11	Koef. pozicije kobilice na krmi	ACU	m/m

Nadalje oblike kontura, koje čine formu broda, moguće je mijenjati varirajući koeficijent  $m$  između vrijednosti 0.1 i 5, kako je prikazano na Slika 4. Na taj način moguće je mijenjati punoću forme na krmi, pramcu, glavnom rebru te punoću krmenog zrcala.



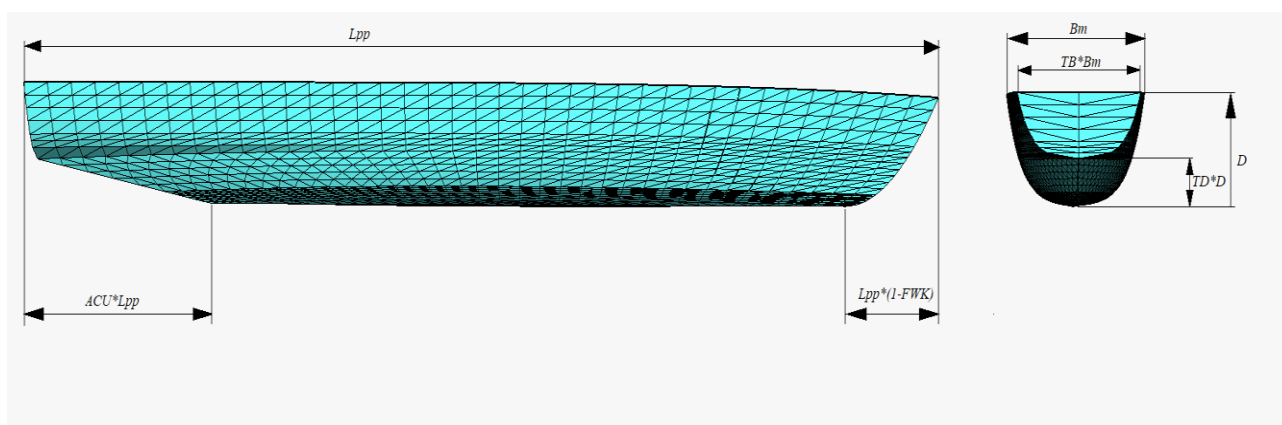
**Slika 4. Krivulje koje opisuju konture vodnih linija analitičke forme [10]**

Vodne linije čine dvije krivulje opisane jednačbom (22) koje se spajaju tangentno na glavnom rebru, kako je prikazano na Slika 5.



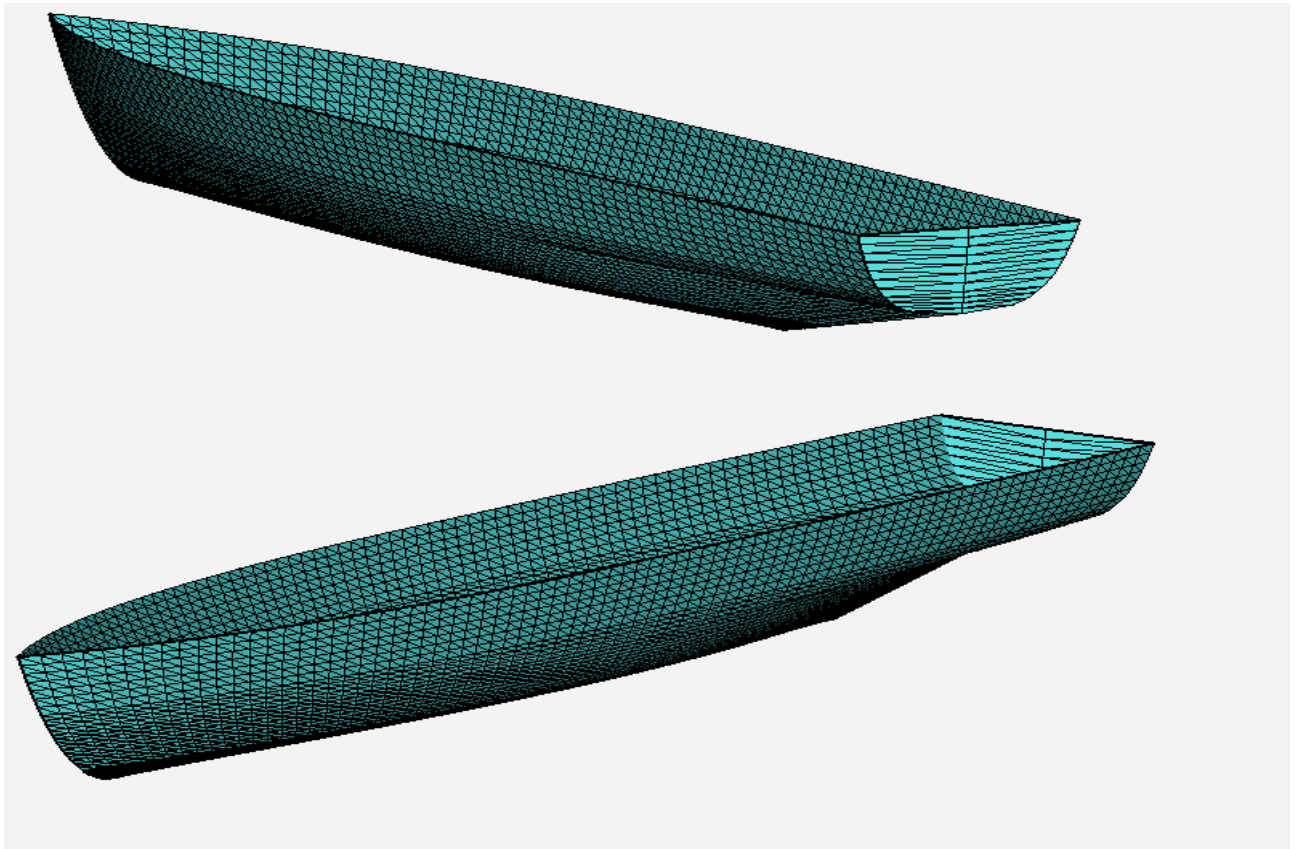
Slika 5. Prikaz vodnih generiranih linija analitičke forme

Parametri glavnih i karakterističnih dimenzija prikazani su na Slika 6.



Slika 6. Parametri glavnih i karakterističnih dimenzija analitičke forme

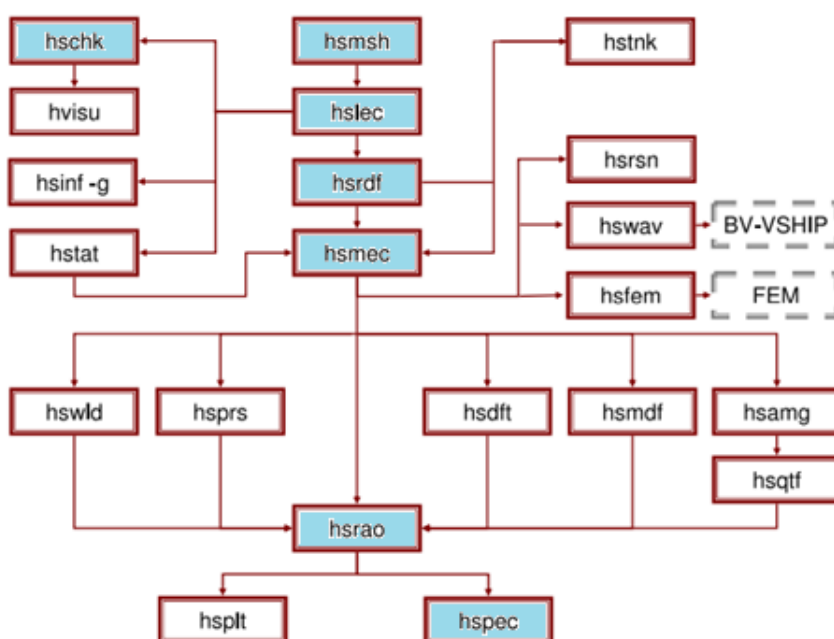
Triangularizacija forme temeljem točaka sa vodnih linija napravljena je u okviru završnog rada [8]. Slika 7. prikazuje triangulariziranu formu broda, s pripadajućim glavnim i karakterističnim dimenzijama.



**Slika 7.    Triangularizirana analitička parametarska forma broda**

## 2.2. Opis programa HydroSTAR

HydroSTAR je program namijenjen za brodsku hidrodinamiku, koji omogućuje potpuno rješavanje problema interakcije trupa i vala, a razvio ga je Bureau Veritas. Program se temelji na potencijalnoj teoriji strujanja difrakcije i radijacije, a uzima u obzir efekte brzine broda, zapljuskivanje u tankovima, te plovidbu u moru ograničene ili neograničene dubine [10]. Program je strukturiran u više modula sa zasebnim funkcijama koji se provode sekvencijalno u svrhu dobivanja rezultata odziva broda na valovima. Svaki modul učitava ulaznu datoteku na temelju koje provodi određenu operaciju ili dio proračuna, te piše izlaznu datoteku. Na Slika 8. prikazana je shema strukture programa HydroSTAR.



Slika 8. Shema programa HydroSTAR [10]

HydroSTAR je programski alat koji nudi inženjeru niz modula za cjelovito rješenje problema interakcije trup val, međutim u okviru ovoga rada obuhvaćena su sljedeći moduli:

Modul HSMSH učitava formu broda zapisanu u obliku poprečnih presjeka po dužini broda te generira datoteku, koja u sebi sadrži opis četverokutne mreže za proračun odziva broda na valovima. Četverokutna mreža odnosno mreža panela, gdje je pojedini opisan s četiri točke koje mogu odstupati unutar 5% dijagonale od ravnine panela.

Modul HSLEC učitava mrežu, a potom je moguće provjeriti modulom HSCHK kvalitetu mreže. Modul HSRDF na temelju učitane mreže i ulaznih podataka o rasponu frekvencija i kutove nailaska pravilnih valova te linearnom viskoznom prigušenju, provodi proračun za određivanje radijacije i difrakcije.

Modul HSMEC provodi proračun gibanja i pomaka, na temelju učitanih podataka o masi i poziciji težišta broda. Modul HSRAO na temelju provedenog proračuna generira RAO funkcije. Modul HSPEC zahtjeva unos informacija o spektru valova, te stanjima mora, te za svako zadano stanje mora računati spektar odziva na temelju dobivenih RAO funkcije.

Modul *Hydrostar* unutar programa *d3v-gsd* omogućuje automatsko generiranje mreže na temelju zadane analitičke forme, te pozivanjem navedenih HydroSTAR (BV) modula provodi proračun odziva broda na valovima.

### 2.3. Opis programskog modula Hydrostar

Modul *Hydrostar* programa *d3v-gsd*, koji je izrađen u okviru ovog diplomskog rada omogućuje generiranje analitičke forme broda u obliku mreže četverokutnih panela, koja je prikladna za unos i provedbu proračuna odziva broda na valovima u programu HydroSTAR. Osim generiranja mreže, program omogućuje korisniku ispis ulaznih datoteka za odabrane module programa HydroSTAR pomoću korisničkog sučelja.

#### 2.3.1. Algoritam za generiranje mreže četverokutnih panela

U radu [8] mreža forme broda napravljena je triangularizacijom, što znači da se mreža sastoji od točaka koje povezane trokutima, kako je već prikazano na Slika 7. Takva forma pogodna je za vizualizaciju i proračun hidrostatičkih karakteristika forme. Međutim, HydroSTAR (BV) u okviru proračuna koje provodi zahtjeva formu broda opisanu mrežom četverokutnih panela. Četverokutna mreža, unutar modula HSMSH, generira se na način da se brodska forma opiše određenim brojem rebara, od kojih svako rebro mora imati jednak broj točaka koje su jednoliko distribuirane po duljini (konturi) rebara.

U ovome radu napravljen je programski kod koji generira četverokutnu mrežu za zadanu analitičku formu i njezine modifikacije, a u ovome poglavlju opisan je algoritam, Slika 9.

Algoritam za generiranje mreže podijeljen je u 4 koraka:

1. određivanje vertikalnih pozicija vodnih linija i uzdužnih pozicija rebara
2. generiranje linije rebara na zadanim uzdužnim pozicijama, sa zadanim brojem točaka (broj vodnih linija)
3. ekvidistantna interpolacija linija rebara sa zadanim brojem točaka
4. generiranje mreže četverokutnih panela

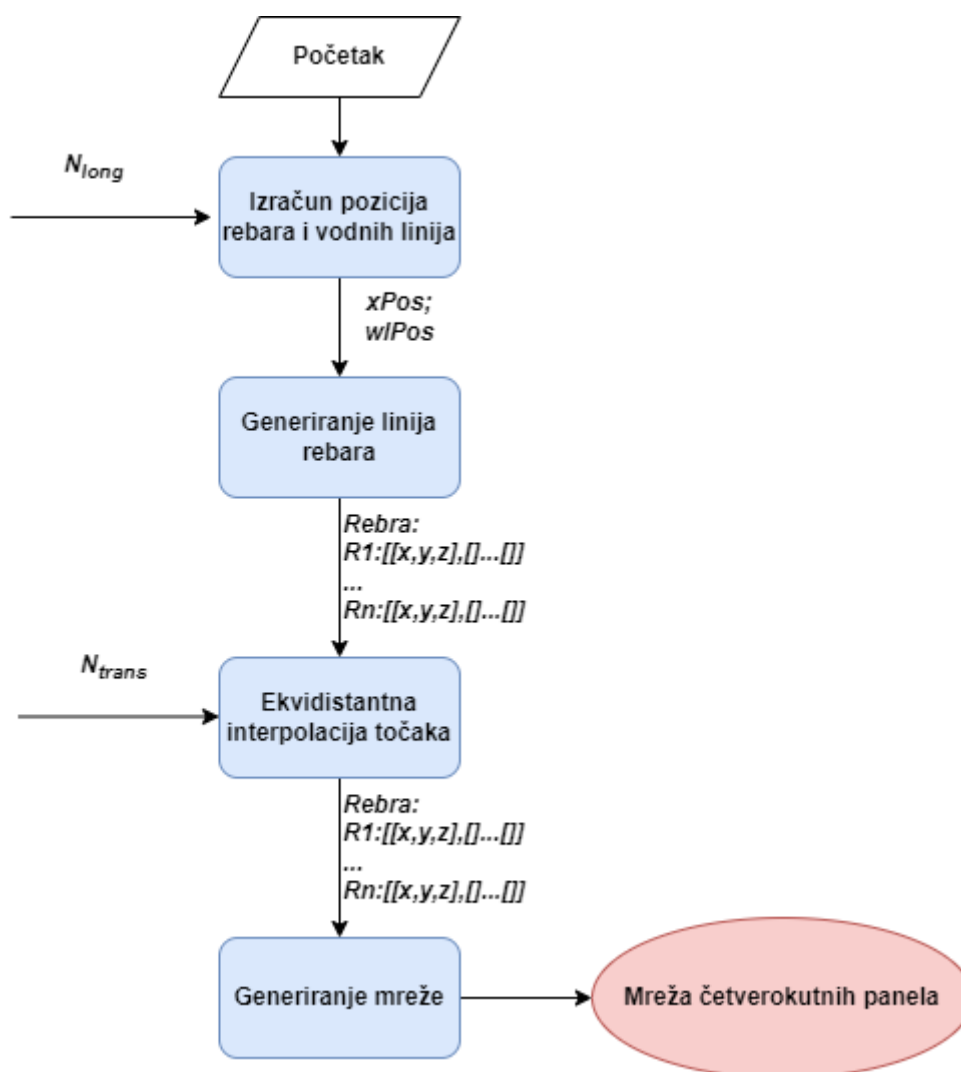
Korisnik odabire gustoću mreže unosom broja rebara  $N_{long}$  i broja točaka po rebro  $N_{trans}$ , odnosno brojem uzdužnih (eng. *longitudinal*) te brojem poprečnih (eng. *transverse*) panela.

Prema preporukama Bureau Veritasa za kalkulacije je dovoljno imati gustoću mreže od oko 1000 panela.

Nakon unosa broja rebara, odnosno točaka po rebri i pokretanja, program generira pozicije rebara, na način da računa razmak između rebara kao omjer duljine ( $L_{pp}$ ) i broja rebara ( $N_{long}$ ). U drugom koraku program generira definirani broj rebara ( $N_{long}$ ), a svako rebro predstavlja liniju koja je opisana listom od 40 točaka u prostoru čije su vertikalne pozicije prethodno određene.

Na temelju dobivenih rebara, program iterira kroz svako rebro te generira nova rebra opisana s definiranim brojem točaka ( $N_{trans}$ ), koje su interpolirane na temelju jednake udaljenosti po duljini rebra.

Konačno program dobivene točke rebara spaja u četverokute i tvori mrežu četverokutnih panela, koja je pogodna za kalkulacije u programu HydroSTAR (BV).



Slika 9. Algoritam za generiranje mreže kvadri-lateralnih panela

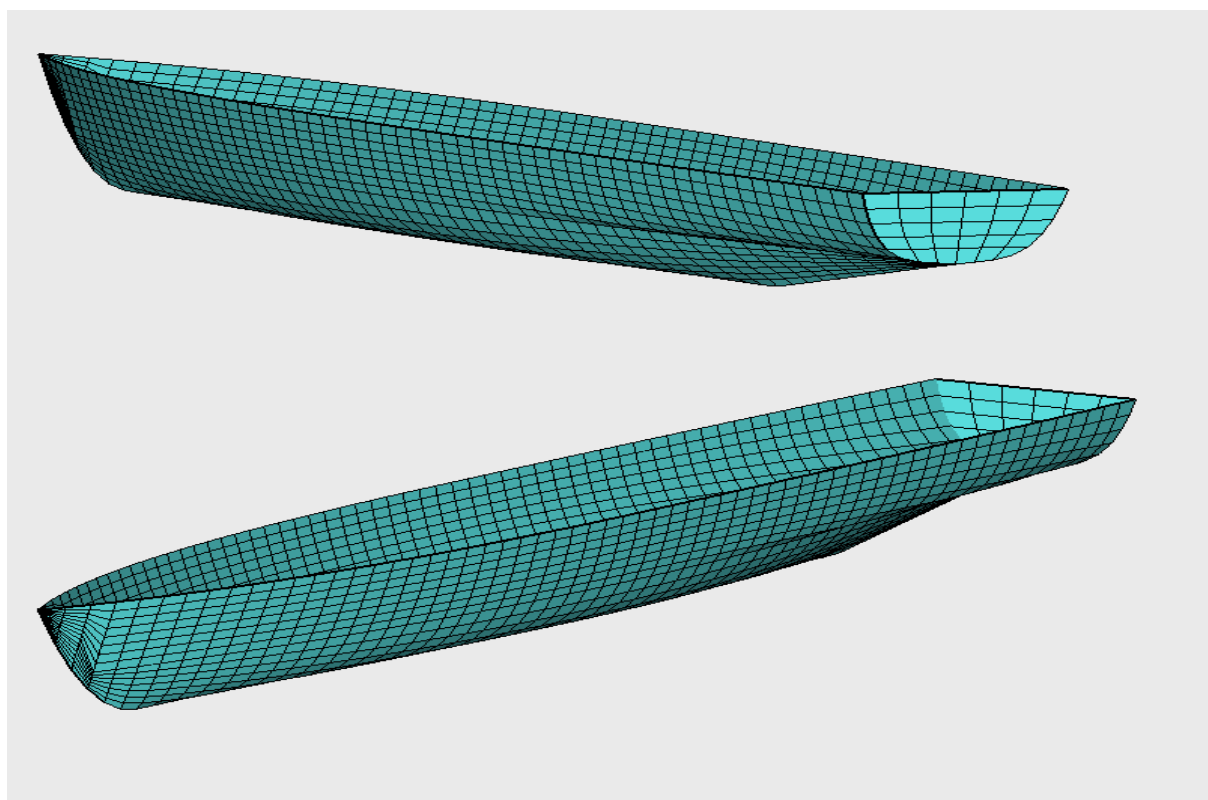


### 2.3.2. Procedura proračuna njihanja broda na valovima

Modul *Hydrostar* programa *d3v-gsd* omogućava kompletnu proceduru pripreme ulaznih podataka i provedbe proračuna njihanja broda na valovima u programu HydroSTAR. Prije svakog proračuna potrebno je definirati naziv projekta, a potom se generiraju ulazni podaci i provodi proračun. Procedura proračuna slijedi tri koraka:

1. generiranje mreže (opisano u 2.3.1.)
2. priprema ulaznih podataka
3. provedba proračuna u programu HydroSTAR na temelju generiranih ulaznih podataka

Nakon inicijalnog učitavanja ili modifikacije forme, program automatski generira mrežu četverokutnih panela, koja je prikazana na Slika 10. Zatim se unose ulazni podaci koji se ispisuju u obliku prikladnih datoteka za učitavanje u programu HydroSTAR. U trećem koraku, program slijedom poziva module programskog alata HydroSTAR, koji čita pripremljene ulazne datoteke, te izvršava određene operacije koje modul u sebi sastoji.



**Slika 10. Četverokutna mreža analitičke parametarske forme**

Priprema ulaznih podataka slijedi logiku svakog pojedinog modula, koji je definiran od samih proizvođača programskog paketa HydroSTAR, a detaljniji opis se može vidjeti u priručniku za korisnike programa [11]. U okviru ovoga rada samo će se istaknuti koji ulazni podaci se unose za ispis ulaznih datoteka pojedinih modula.

Modul HSLEC učitava ulaznu datoteku ekstenzije „hst“ koja u sebi sadrži zapis mreže četverokutnih panela, u obliku indeksiranog popisa točaka mreže te popisa četverokutnih panela sa pripadajućim točkama. Modul HSCHK učitava istu ulaznu datoteku, a potom provodi provjeru ispravnosti mreže.

Modul HSRDF učitava ulaznu datoteku ekstenzije „rdf“ koja u sebi sadrži informacije u rasponu ispitivanih frekvencija  $\omega$  i kutova nailaska valova  $\beta$  (od minimalne do maksimalne vrijednosti).

Modul HSMCN učitava ulaznu datoteku ekstenzije „mec“ koja sadrži informacije o masi broda u kilogramima, radijuse tromosti oko sve tri osi te položaje točke težišta i referentne točke te koeficijent linearnog viskozno-griženja *LVP*. Referentna točka je točka broda za koju se računaju pomaci i rotacije. Za *LVP* obično se uzima preporučena vrijednost od 5%.

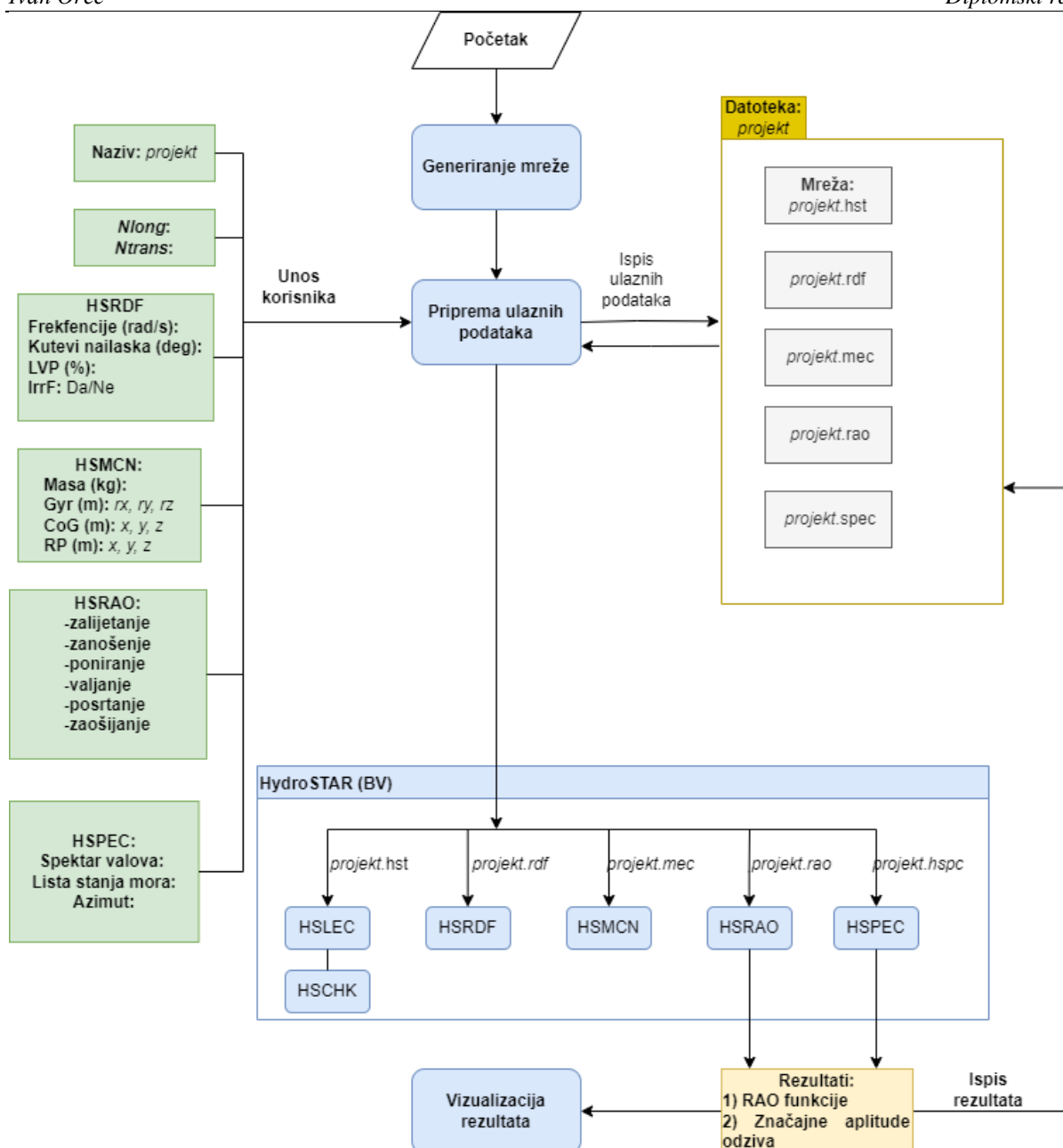
Modul HSRAO učitava ulaznu datoteku ekstenzije „rao“ u kojoj su zapisane naredbe za generiranje i imena prijenosnih funkcije translacijskih i rotacijskih gibanja. HydroSTAR sadrži još i više opcija za generiranje prijenosnih funkcija kao npr. brzine, ubrzanja, koji u kontekstu ovoga rada nisu razmatrani.

Modul HSPEC provodi spektralnu analizu za svako definirano stanje mora. Ulazna datoteka za modula HSPEC je ekstenzije „hspc“ i sadrži listu stanja mora u kojem je svako stanje mora definirano spektrom valova određene značajne valne visine  $H_s$ , vršnog perioda  $T_p$ , koeficijentom  $\gamma$  i kutom nailaska  $\beta$ , na određenom rasponu frekvencija  $\omega$ . Nakon provedbe spektralne analize modul HSPEC zapisuje rezultate u mapi *projekt\_spec* gdje sprema rezultate, u obliku tekstualnih datoteka, prijenosnih funkcije *RAO* te rezultate značajnih amplituda traženih odziva.

Program redom poziva sljedeće module s pripadajućim ulaznim datotekama:

- HSLEC: *projekt.hst*
- HSCHK: *projekt.hst*
- HSRDF: *projekt.rdf*
- HSMCN: *projekt.mec*
- HSRAO: *projekt.rao*
- HSPEC: *projekt.hspc*

Dijagram toka procedure proračuna njihanja broda na valovima unutar modula d3v-gsd *Hydrostar* prikazan je na Slika 11.

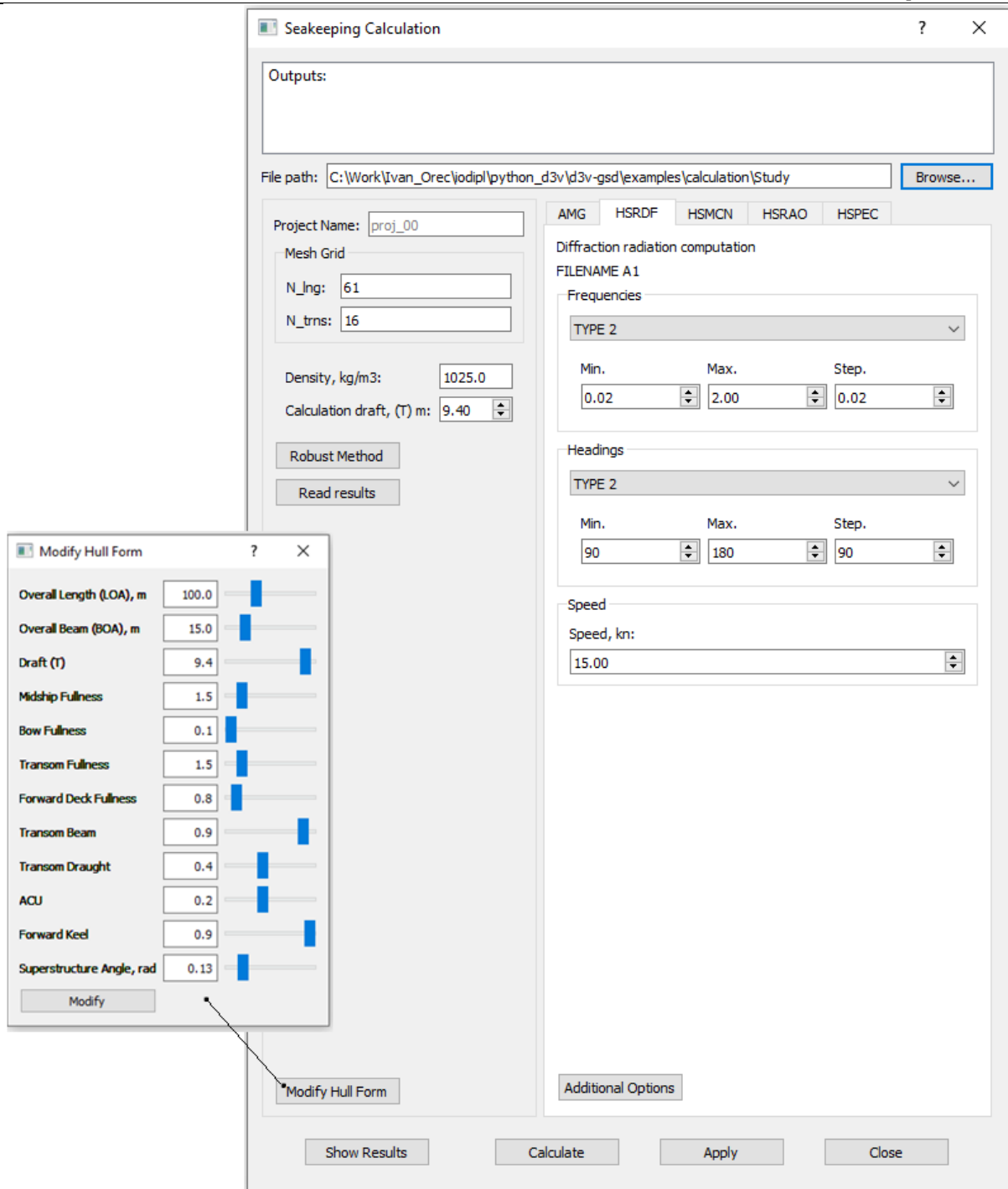


Slika 11. Dijagram toka procedure proračuna njihanja broda na valovima

### 2.3.3. Korisničko sučelje modula Hydrostar

Unutar modul Hydrostar napravljeno je korisničko sučelje koje omogućuje korisniku unos i ispis ulaznih podataka, modifikaciju analitičke forme, automatiziranu provedbu proračuna pomorstvenosti u programu HydroSTAR na temelju generiranih ulaznih podataka te učitavanje i vizualizaciju dobivenih rezultata.

Korisničko sučelje i prozor za modifikaciju forme programskog modula *Hydrostar* prikazano je na Slika 12.



Slika 12. Korisničko sučelje programskog modula *Hydrostar*

## 4. ANALIZA UTJECAJA PARAMETARA

### 4.1. Robusna metoda

Analiza utjecaja parametara analitičke forme na odzive njihanja i ljuljanja provedena je uporabom programa *d3v-gsd*. Kako je već rečeno, analitička forma može se modificirati promjenom 11 različitih parametara, svaki pojedini se u okviru ove studije analizirao zasebno uz osnovnu pretpostavku da se promjene parametara mogu razmatrati neovisno jednih od drugih, kako su to radili i Babadi i Ghassemi [5].

Za potrebe ove analize izrađena je programska funkcija unutar modula *Hydrostar* nazvana *robustna metoda*, koja automatizirano provodi niz proračuna varirajući parametre 1-7 od -15% do +15% uz korak od 5%, odnosno parametre 8-11 od -12% do +8% uz korak od 4% (zbog ograničenja domene prilikom generiranja forme broda). Takav pristup pretpostavlja varijacije parametara u odnosu na inicijalnu formu broda, koja se učitava prije samog pokretanja *robustne metode*. Inicijalne vrijednosti parametra i njihove varijacije prikazani su na Tablica 3.

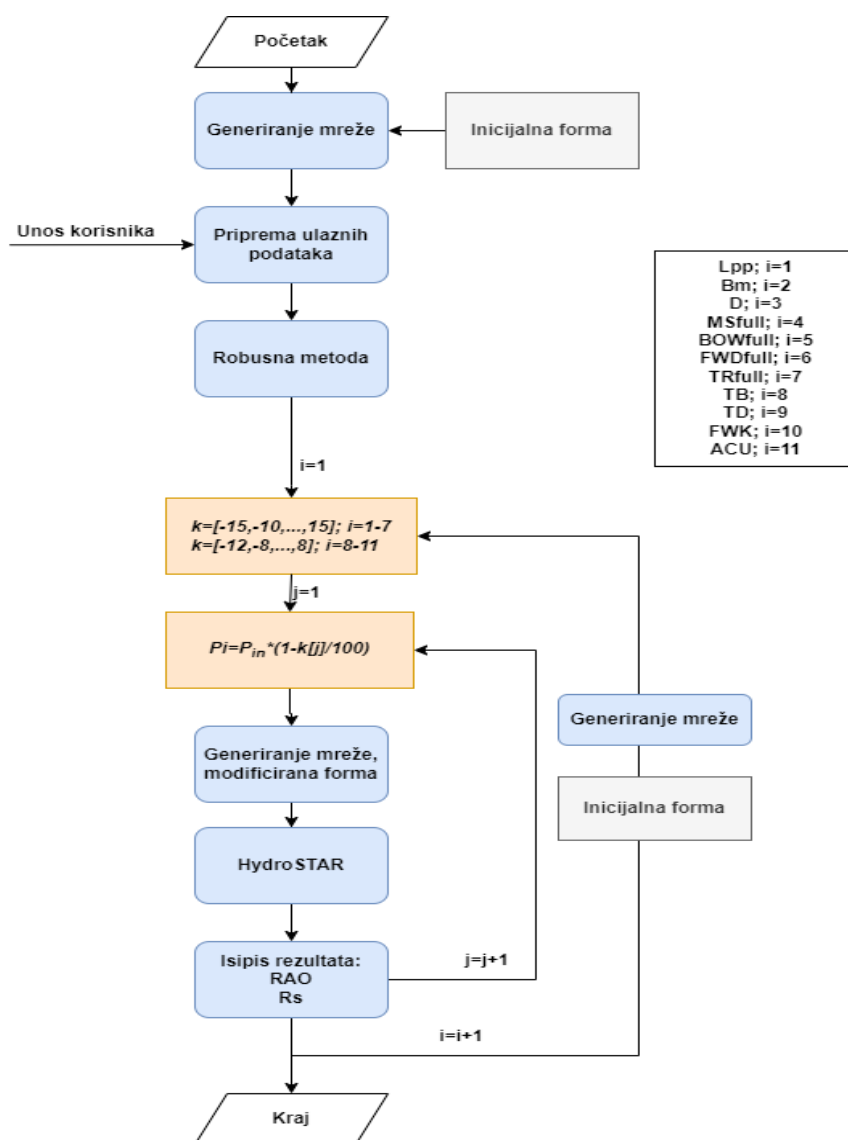
Tablica 3. Parametri inicijalne forme broda

Br.	Parametar	Inicijalna vrijednost	Varijacije						
			-15%	-10%	-5%	0%	5%	10%	15%
1	$L_{pp}$ (m)	100,00	85	90	95	100	105	110	115
2	$B_m$ (m)	15,00	12,75	13,5	14,25	15	15,75	16,5	17,25
3	$D$ (m)	9,40	7,99	8,46	8,93	9,4	9,87	10,34	10,81
4	$MS_{full}$	1,50	1,275	1,35	1,425	1,5	1,575	1,65	1,725
5	$AFT_{full}$	0,10	0,085	0,09	0,095	0,1	0,105	0,11	0,115
6	$FWD_{full}$	1,50	1,275	1,35	1,425	1,5	1,575	1,65	1,725
7	$TR_{full}$	0,80	0,68	0,72	0,76	0,8	0,84	0,88	0,92
Br.	Parametar	Inicijalna vrijednost	-12%	-8%	-4%	0%	4%	8%	
8	$TB$	0,90	0,765	0,81	0,855	0,9	0,945	0,99	
9	$TD$	0,40	0,34	0,36	0,38	0,4	0,42	0,44	
10	$FWK$	0,20	0,17	0,18	0,19	0,2	0,21	0,22	
11	$ACU$	0,90	0,765	0,81	0,855	0,9	0,945	0,99	

Provedeno je ukupno 73 proračuna njihanja na 73 različite forme broda, dobivenih varijacijom parametara inicijalne forme. U skladu s osnovnom pretpostavkom, analiza utjecaja varijacije parametara na odzive njihanja i ljuljanja, provedena je za svaki parametar zasebno zanemarujući međusobni utjecaj. Robusna metoda započinje učitavanjem inicijalne forme, na temelju koje se provodi ispitivanje utjecaja.

U ovome radu provedeno je ispitivanje utjecaja parametara na značajne amplitude odziva ljuljanja i posrtanja. Prema kriterijima pomorstvenosti koji su postavljeni za patrloni brod Hrvatske ratne mornarice [12], odabrani su kriteriji za validaciju. Značajna amplituda valjanja mora biti manja od  $4^\circ$ , a značajna valna amplituda posrtanja mora biti manja od  $1.5^\circ$  za zadano stanje mora 4 ( $H_S=1.8\text{m}$ ) prema ljestvici WMO-a (eng. *World Metereological Organization*), pri brzini od 15 čv. Kako je već poznato iz iskustva amplitude odziva ljuljanja bit će najveće u slučaju nailaska valova na bok  $\beta = 90^\circ$ , odnosno u slučaju nailaska valova na pramac  $\beta = 180^\circ$  za amplitude odziva posrtanja, prema tome proračuni u okviru ove analize provedeni su za navedena 2 kuta nailaska. Stanja mora opisana su JONSWAP valnim spektrom, čije su značajke već prikazane u Tablica 1.

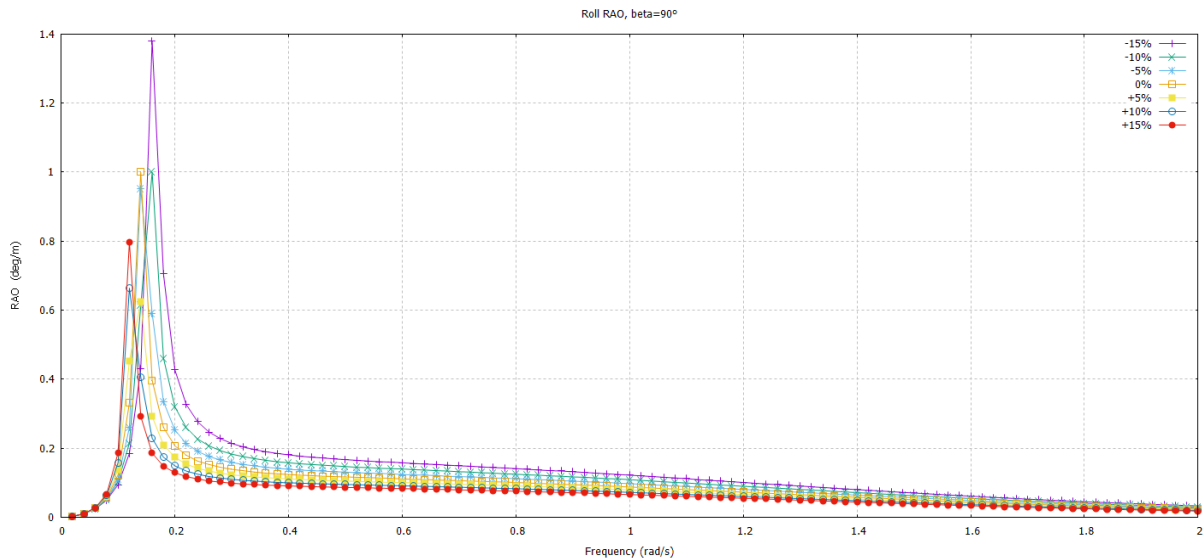
Dijagram toka robusne metode prikazan je na Slika 13.



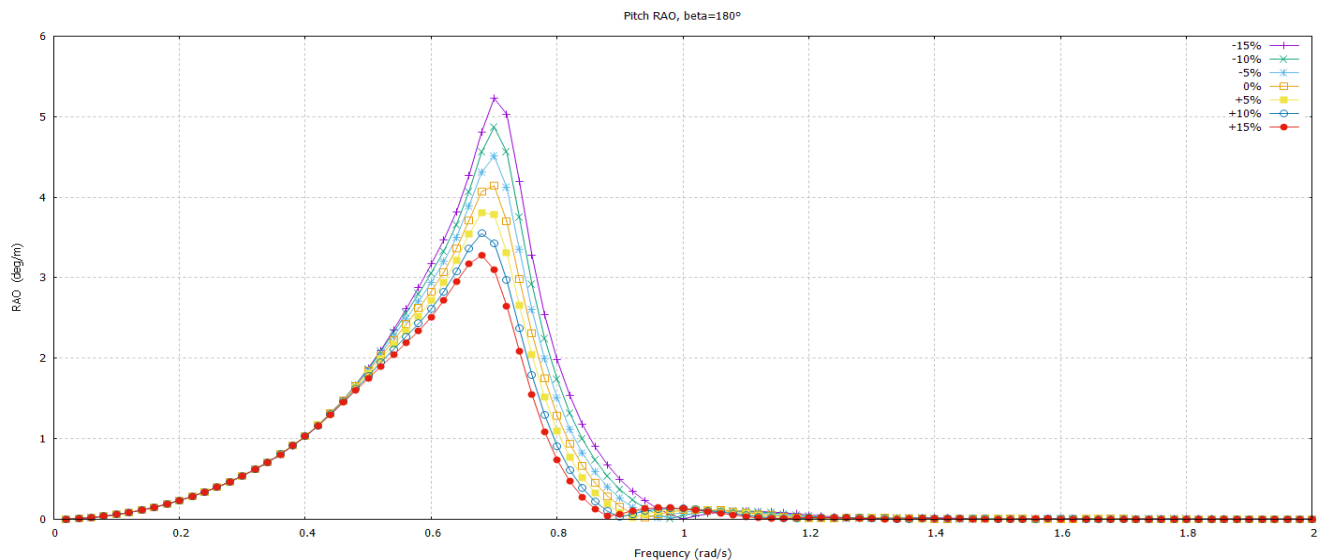
Slika 13. Dijagram toka robusne metoda

#### 4.2. Analiza utjecaja varijacije duljine broda $L_{pp}$

Parametar duljine analitičke forme variran je u rasponu od -15% do +15% u odnosu na duljinu inicijalne forme od 100 m. Za svaku varijaciju forme proveden je proračun odziva ljuljanja i posrtanja, te su prikazani rezultati u obliku dijagrama prijenosnih funkcija RAO, te značajne valne amplitude ljuljanja odnosno posrtanja u ovisnosti o dulji odnosno volumenu. Na Slika 14. i Slika 15. prikazan je utjecaj varijacije duljine  $L_{pp}$  na RAO prijenosne funkcije za valjanje i posrtanje.

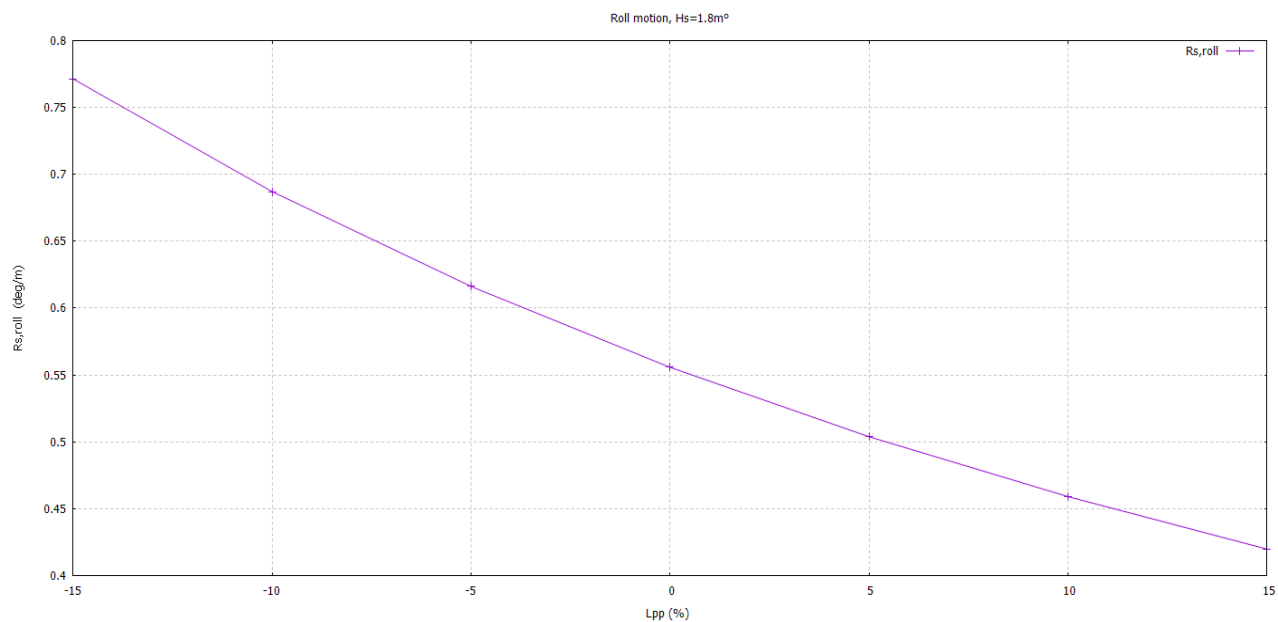


Slika 14. Utjecaj  $L_{pp}$  na RAO ljuljanja  $\eta_4$

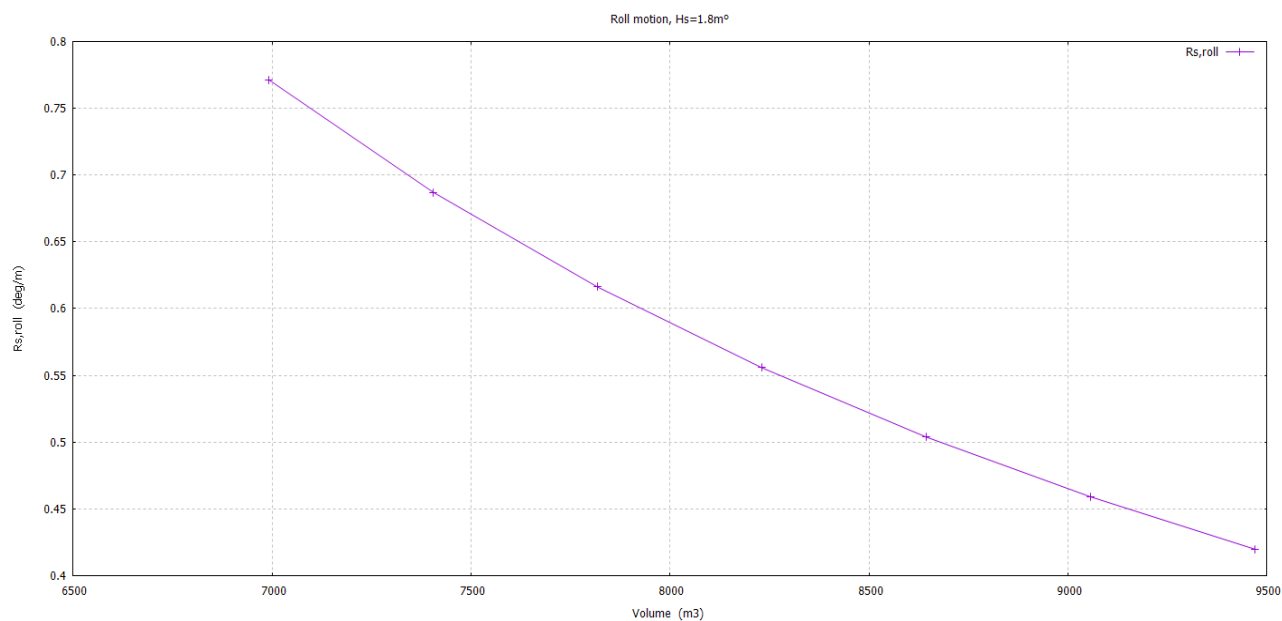


Slika 15. Utjecaj  $L_{pp}$  na RAO posrtanja  $\eta_5$

Zanimljivo je uočiti da je maksimum RAO funkcije posrtanja povećava s smanjenjem parametra duljine  $L_{pp}$  te da se značajne razlike događaju samo između frekvencija 0.5-1. Kod RAO funkcija ljuljanja značajna odstupanja se događaju pri malim frekvencijama 0.1-0.2.



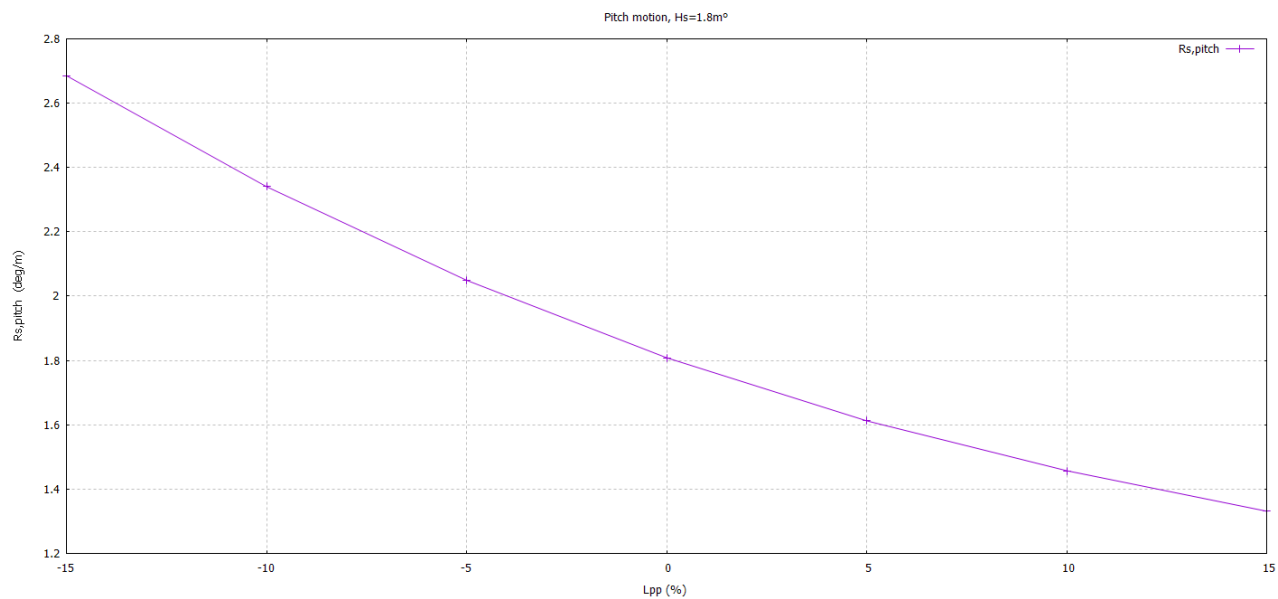
Slika 16. Utjecaj duljine  $L_{pp}$  (m) na ljujanje  $R_{S,\eta_4}$



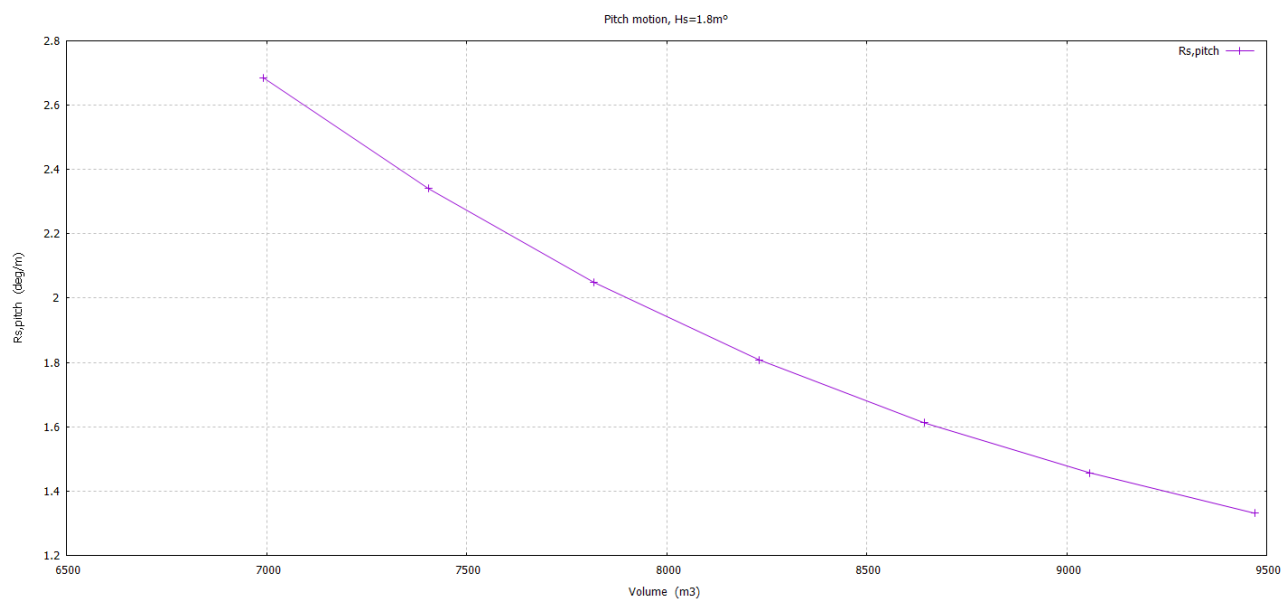
Slika 17. Utjecaj duljine na ljujanje  $R_{S,\eta_4}$  u odnosu na volumen istisnine  $V$  (m<sup>3</sup>)

Kako se vidi iz dijagrama, Slika 16. i Slika 17., značajna valna amplituda ljujanja  $R_{S,\eta_4}$  opada proporcionalno s porastom duljine i porastom volumena.





Slika 18. Utjecaj duljine  $L_{pp}$  (m) na posrtanje  $R_{S,\eta 5}$

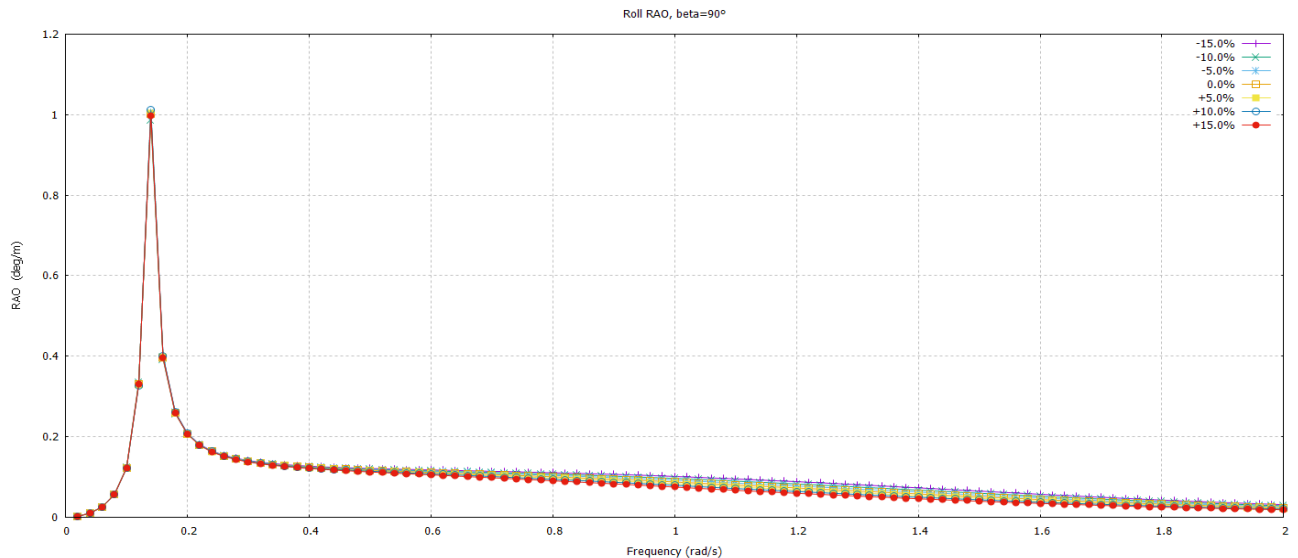


Slika 19. Utjecaj duljine na posrtanje  $R_{S,\eta 5}$  u odnosu na volumenu istisnine  $V$  (m<sup>3</sup>)

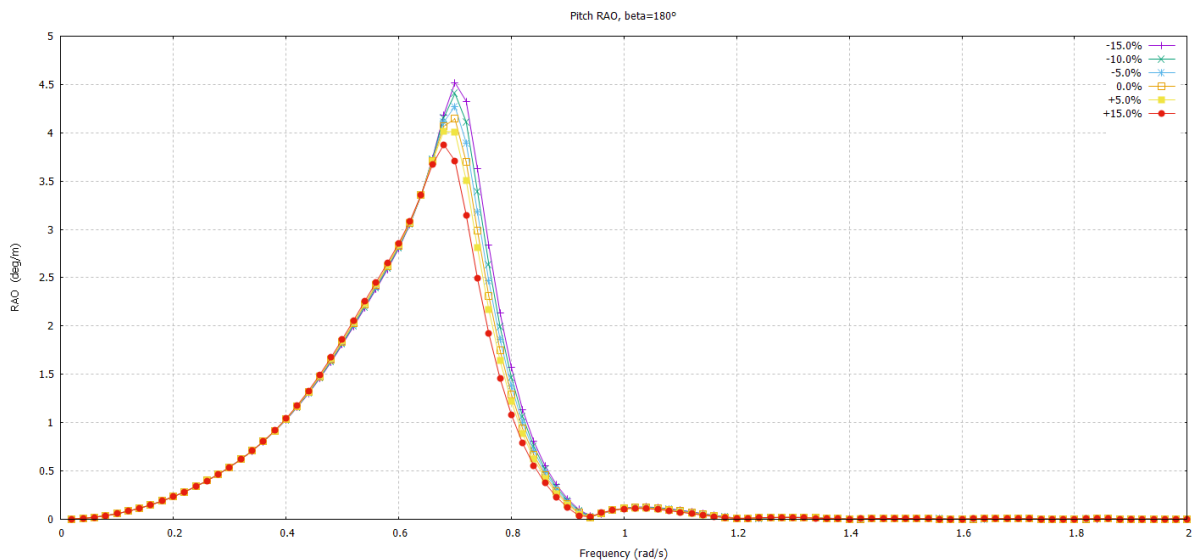
Kako se vidi iz dijagrama, Slika 18. i Slika 19., značajna valna amplituda posrtanja  $R_{S,\eta 5}$  opada proporcionalno s porastom duljine i porastom volumena.

### 4.3. Analiza utjecaja varijacije širine broda $B_m$

Parametar širine analitičke forme variran je u rasponu od -15% do +15% u odnosu na širinu inicijalne forme od 15 m. Za svaku varijaciju forme proveden je proračun odziva ljujanja i posrtanja, te su prikazani rezultati u obliku dijagrama prijenosnih funkcija RAO, te značajne valne amplitude ljujanja odnosno posrtanja u ovisnosti o širini odnosno volumenu. Na Slika 20. i Slika 21. prikazan je utjecaj varijacije širine  $B_m$  na RAO prijenosne funkcije za valjanje i posrtanje.

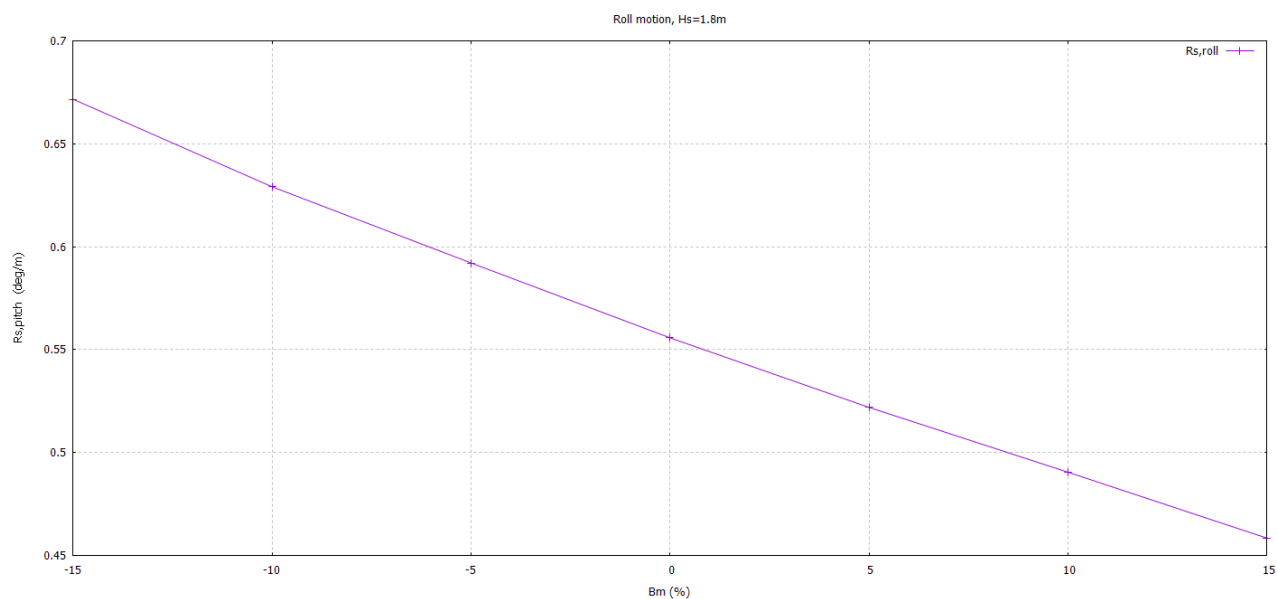


Slika 20. Utjecaj  $B_m$  na RAO ljujanja  $\eta_4$

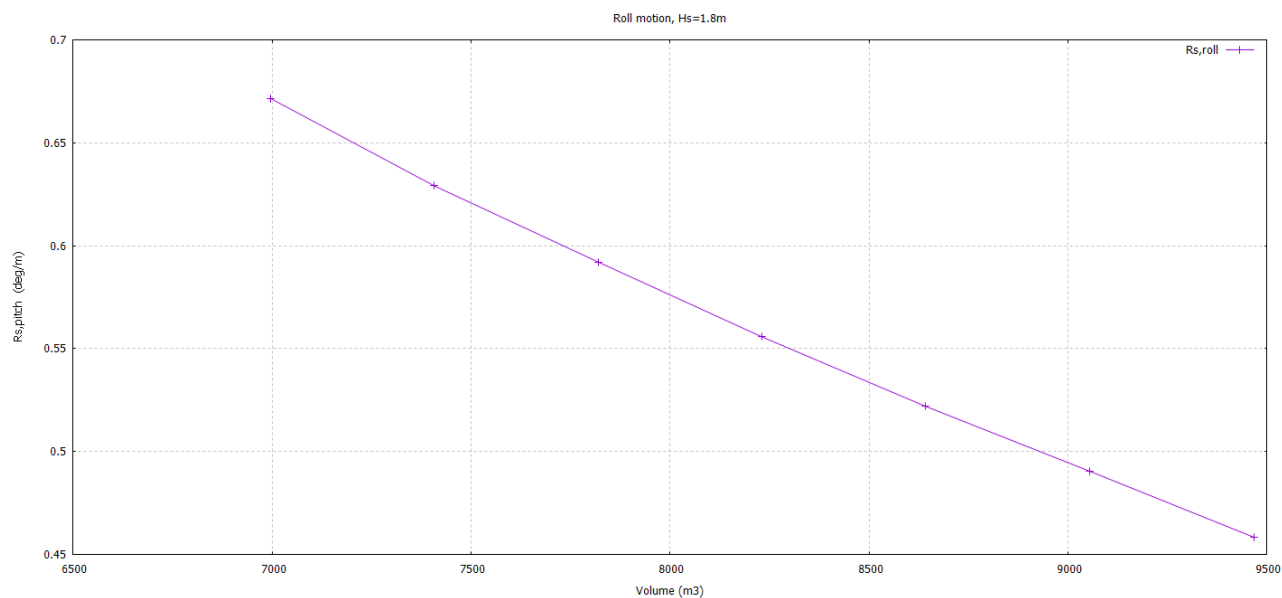


Slika 21. Utjecaj  $B_m$  na RAO posrtanja  $\eta_5$

U slučaju varijacija širine  $B_m$  utjecaj na RAO funkcije ljujanja je gotovo neznan, dok se kod RAO funkcija posrtanja maksimum funkcije opada s povećanjem širine, kako se vidi iz dijagrama Slika 20. i Slika 21.

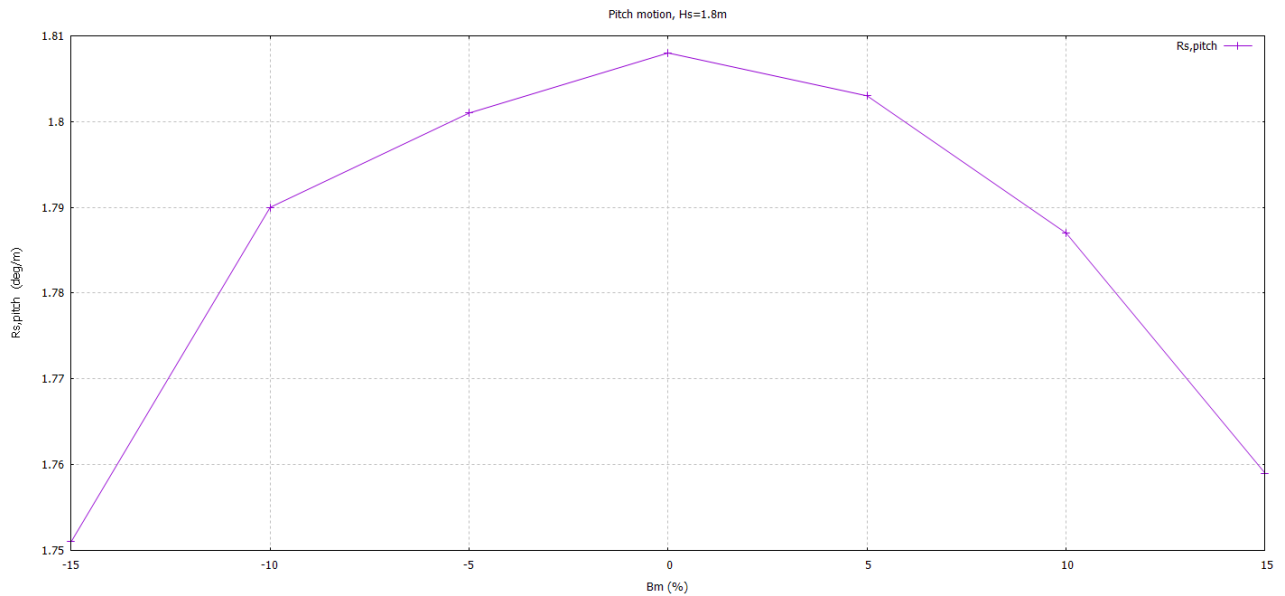


Slika 22. Utjecaj širine  $B_m$  (m) na ljujanje  $R_{S,\eta_4}$

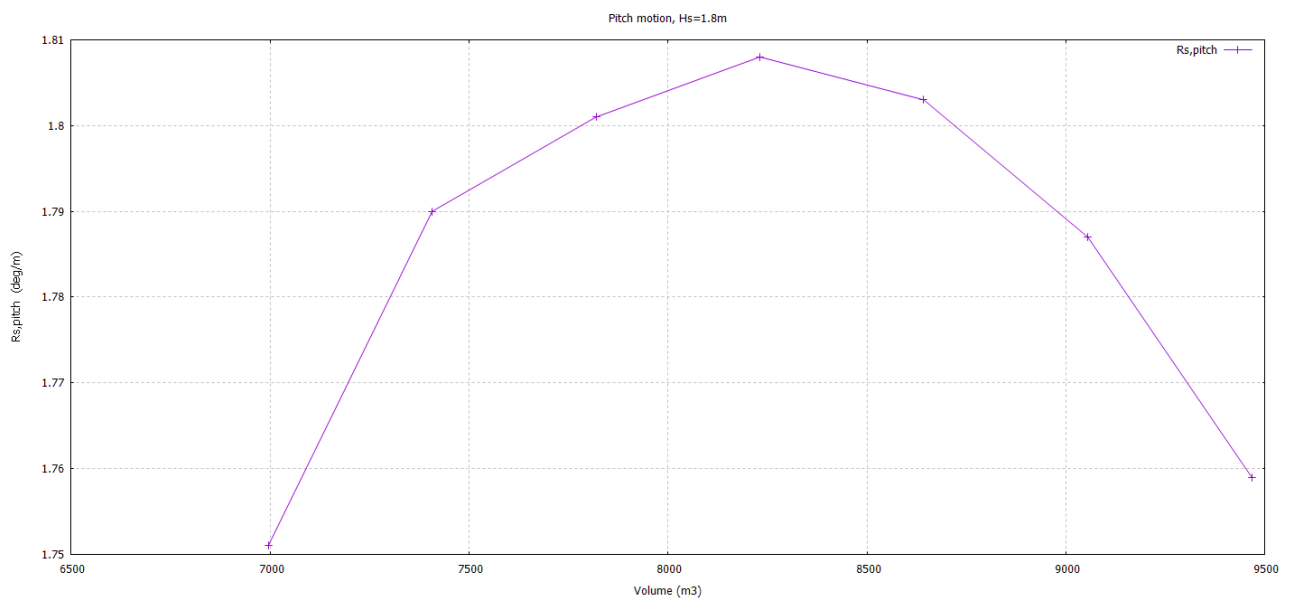


Slika 23. Utjecaj širine na ljujanje  $R_{S,\eta_4}$  u odnosu na volumen istisnine  $V$  (m³)

Kako se vidi iz dijagrama, Slika 22. i Slika 23., značajna valna amplituda ljujanja  $R_{S,\eta_4}$  opada proporcionalno s porastom širine i porastom volumena.



Slika 24. Utjecaj širine  $B_m$  (m) na posrtanje  $R_{S,\eta_5}$

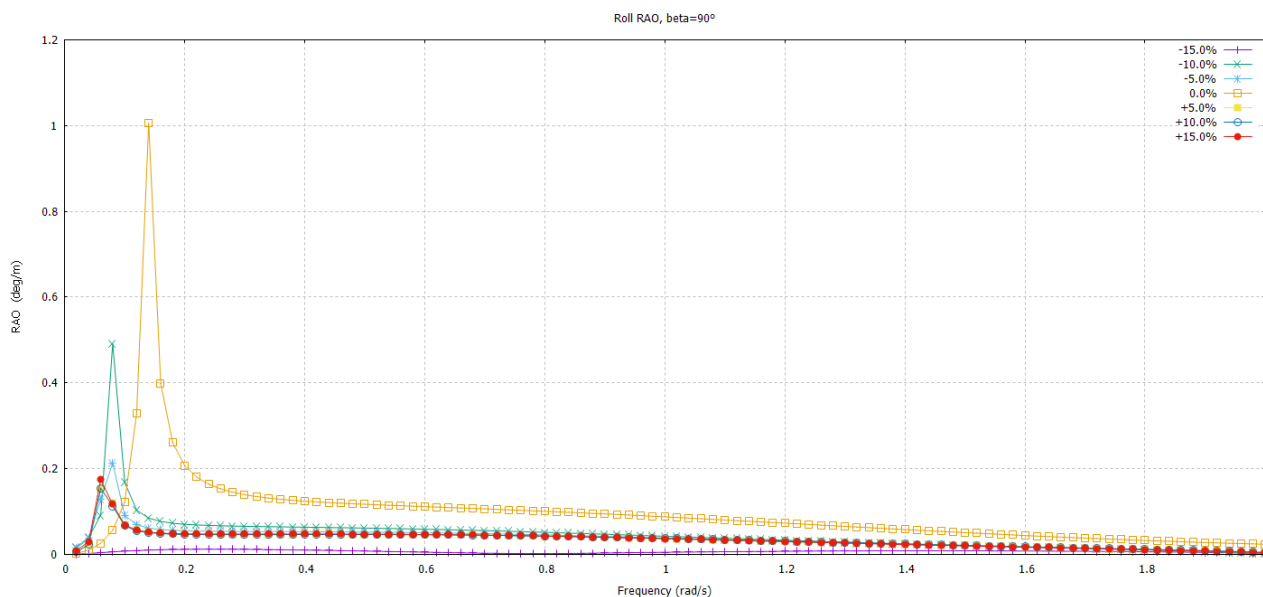


Slika 25. Utjecaj širine na posrtanje  $R_{S,\eta_5}$  u odnosu na volumenu istisnine  $V$  (m<sup>3</sup>)

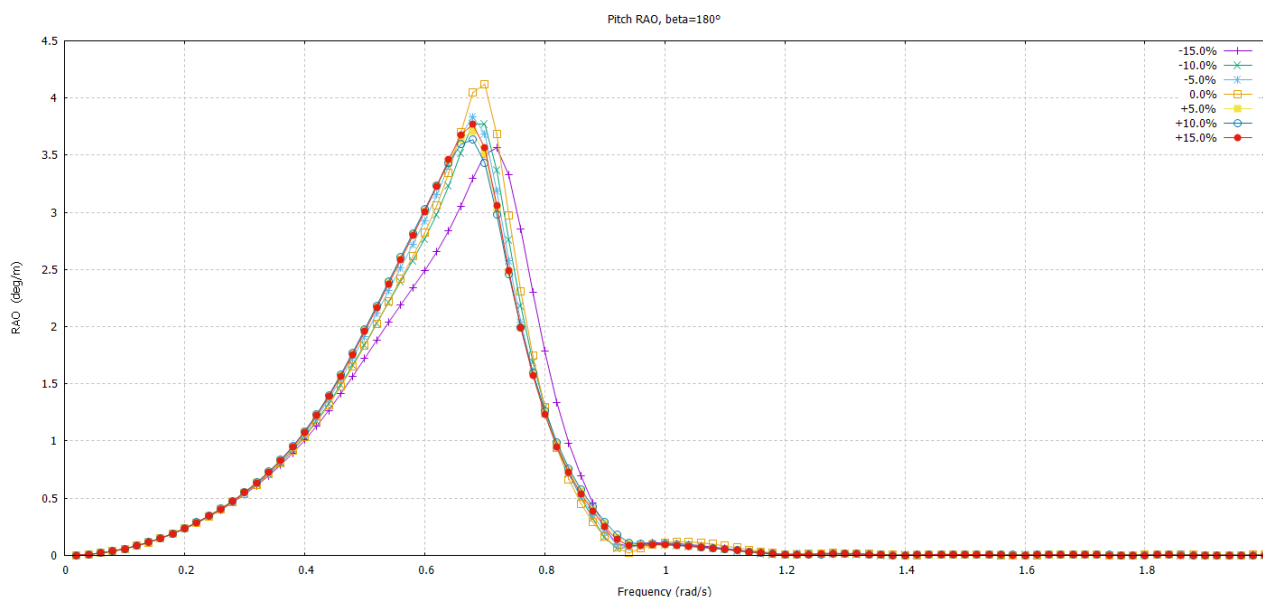
Zanimljivo je ponašanje značajne amplitude posrtanja  $R_{S,\eta_5}$  s obzirom na širinu  $B_m$  odnosno volumen, kako se vidi sa Slika 24. i Slika 25., značajna amplituda raste od minimalne do maksimalne vrijednosti u rasponu varijacija širina -15% do 0%, a opada od maksimalne vrijednosti u rasponu varijacija širina 0% do 15%.

#### 4.4. Analiza utjecaja varijacije gaza broda $D$

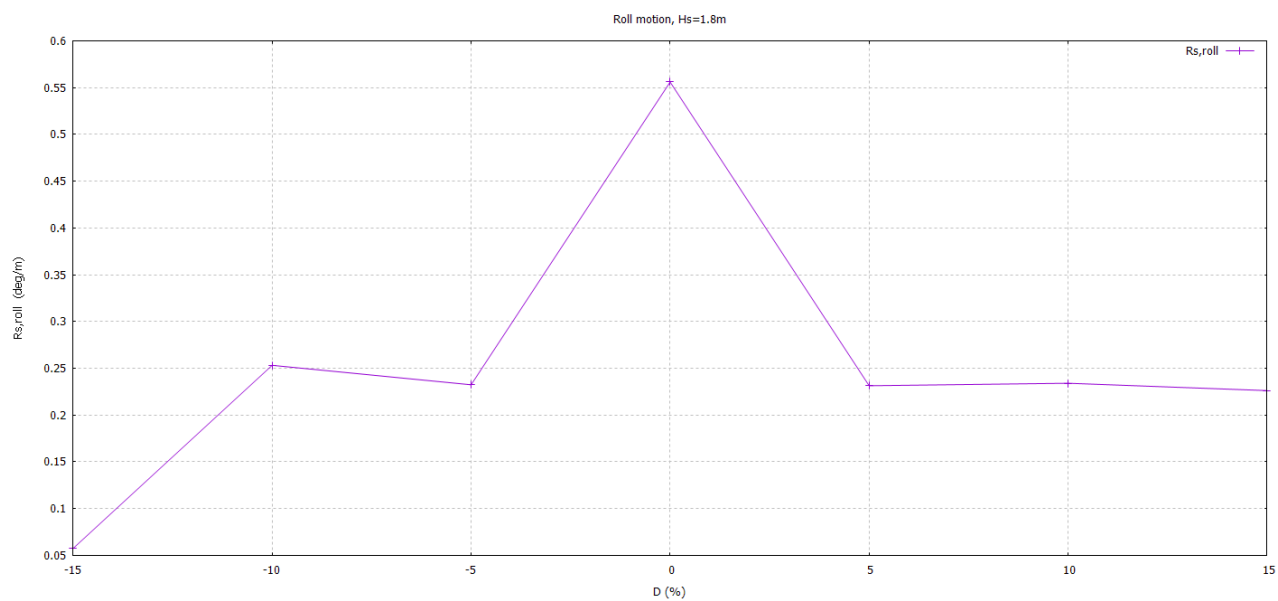
Parametar gaza  $D$  analitičke forme variran je u rasponu od -15% do +15% u odnosu na gaz inicijalne forme od 9.4 m. Za svaku varijaciju forme proveden je proračun odziva ljuľjanja i posrtanja, te su prikazani rezultati u obliku dijagrama prijenosnih funkcija RAO, te značajne valne amplitude ljuľjanja odnosno posrtanja u ovisnosti o gazu odnosno volumenu. Na Slika 26. i Slika 27. prikazan je utjecaj varijacije gaza  $D$  na RAO prijenosne funkcije za valjanje i posrtanje.



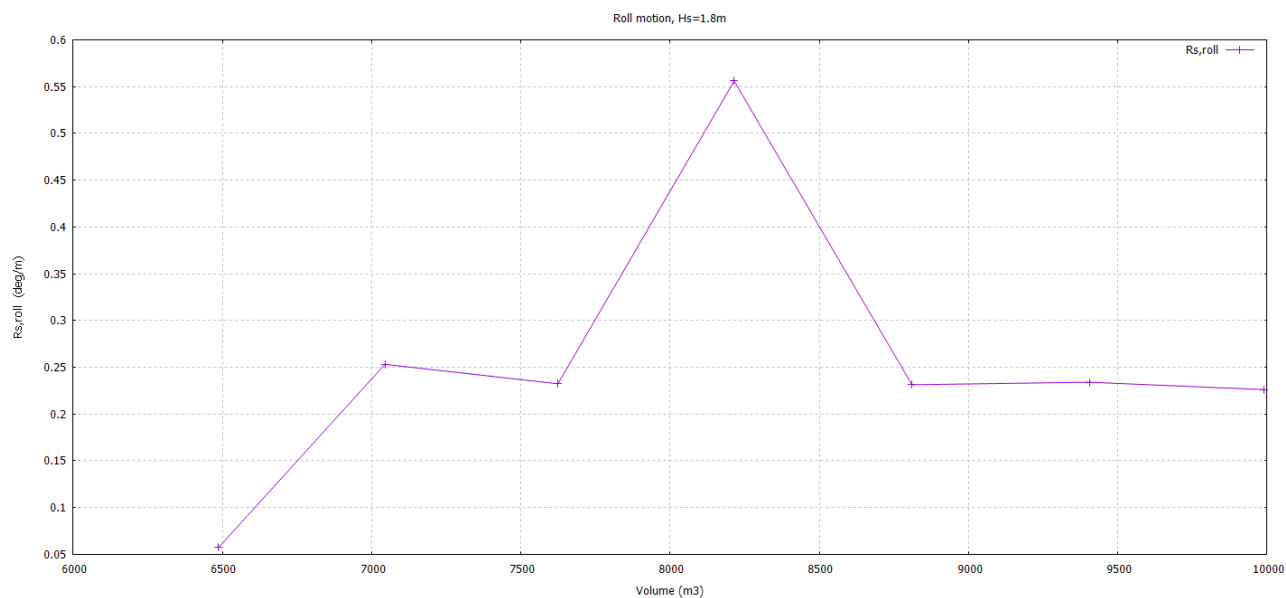
Slika 26. Utjecaj  $D$  na RAO ljuľjanja  $\eta_4$



Slika 27. Utjecaj  $D$  na RAO posrtanja  $\eta_5$

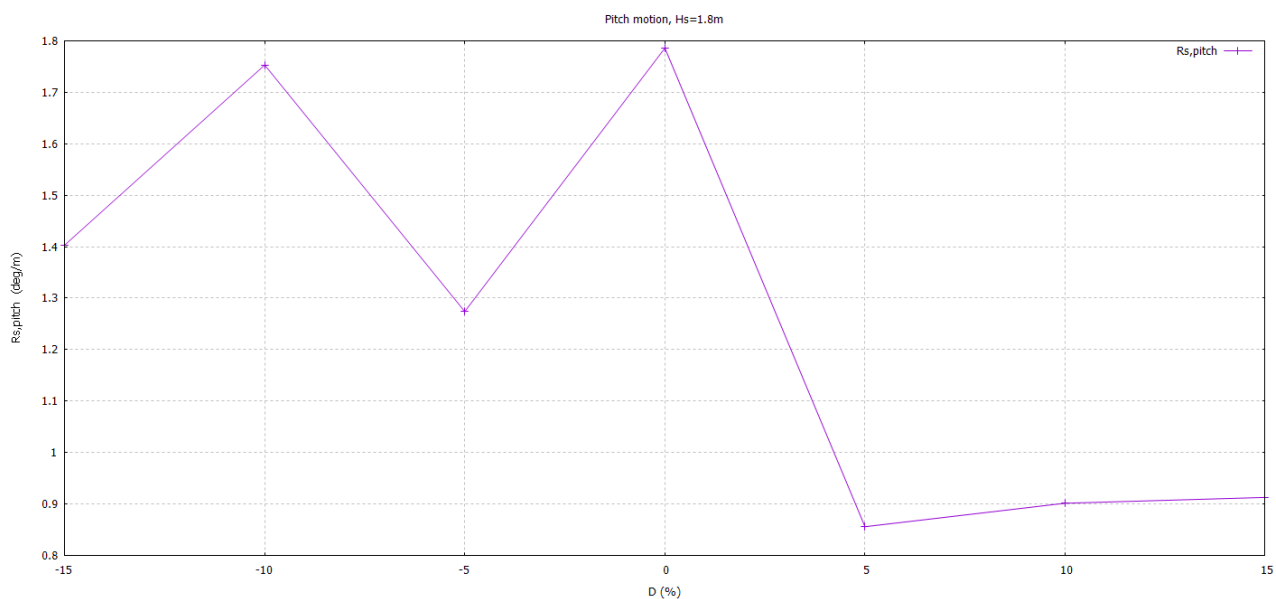


Slika 28. Utjecaj gaza  $D$  (m) na ljuljanje  $R_{S,\eta 4}$

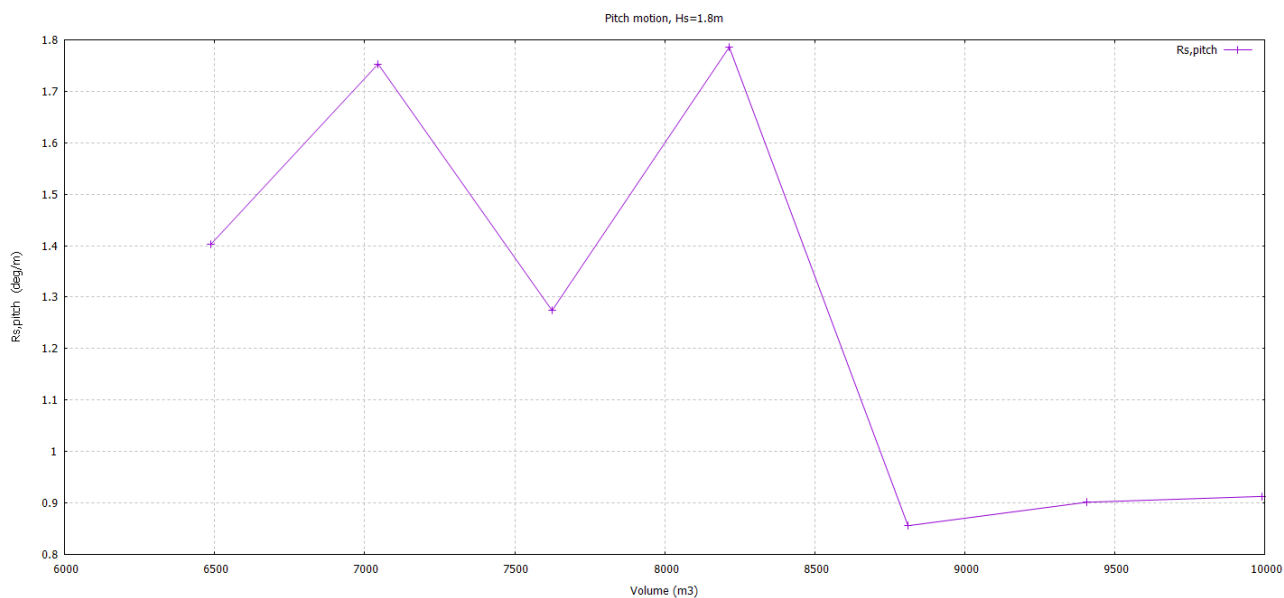


Slika 29. Utjecaj gaza na ljuljanje  $R_{S,\eta 4}$  u odnosu na volumen istisnine  $V$  (m<sup>3</sup>)

Utjecaj gaza na odzive ljuljana prikazan je na Slika 28. i Slika 29., i kao što se vidi ne može se uočiti jednostavna korelacija između značajne amplitude odziva i varijacija gaza.



Slika 30. Utjecaj gaza  $D$  (m) na posrtanje  $R_{S, \eta 5}$

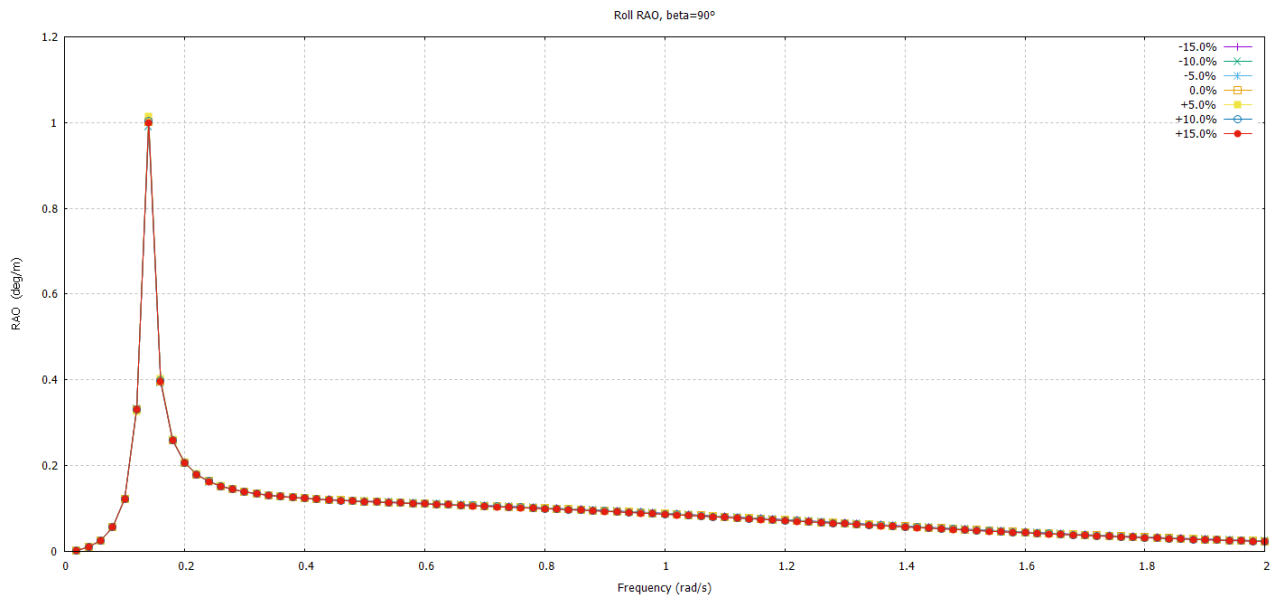


Slika 31. Utjecaj gaza na posrtanje  $R_{S, \eta 5}$  u odnosu na volumenu istisnine  $V$  (m³)

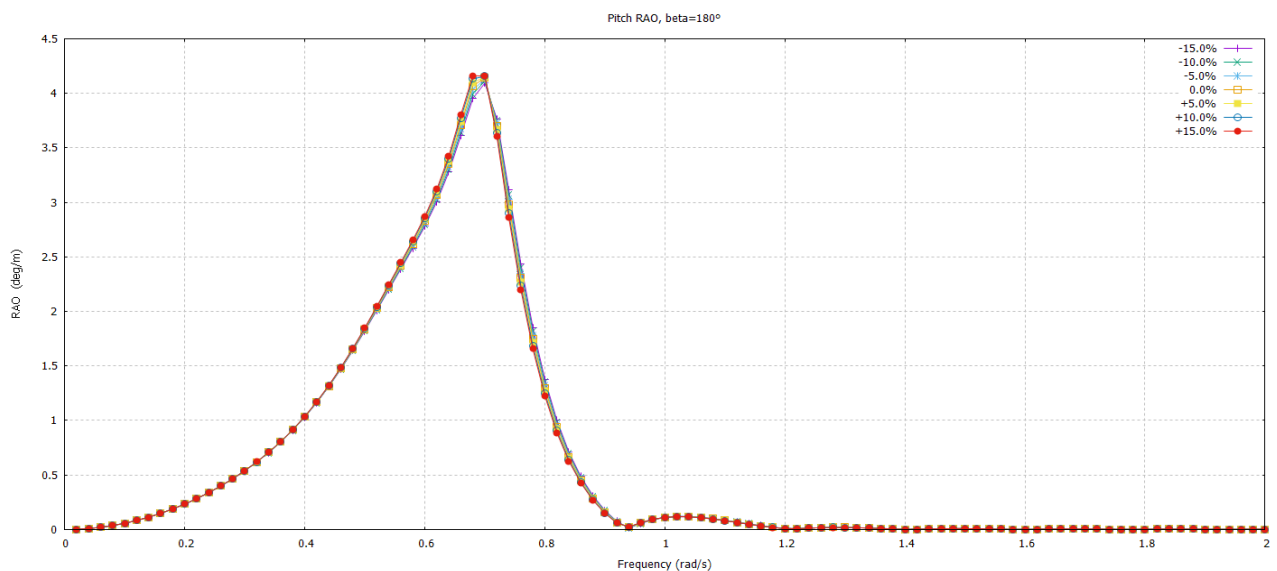
Utjecaj gaza na odzive posrtanja prikazan je na Slika 30. i Slika 31., i slično kao i za ljuljanje ne može se uočiti jednostavna korelacija između značajne amplitude odziva i varijacija gaza.

#### 4.5. Analiza utjecaja varijacije punoće gl. rebra $MS_{full}$

Parametar koeficijent punoće glavnog rebra  $MS_{full}$  analitičke forme variran je u rasponu od -15% do +15% u odnosu na koeficijent punoće gl. rebra inicijalne forme koji iznosi  $MS_{full}=1.5$ . Za svaku varijaciju forme proveden je proračun odziva ljuľanja i posrtanja, te su prikazani rezultati u obliku dijagrama prijenosnih funkcija RAO, te značajne valne amplitude ljuľanja odnosno posrtanja u ovisnosti o koef. punoće  $MS_{full}$  odnosno volumenu. Na Slika 32. i Slika 33. prikazan je utjecaj varijacije koef.  $MS_{full}$  na RAO prijenosne funkcije za valjanje i posrtanje.



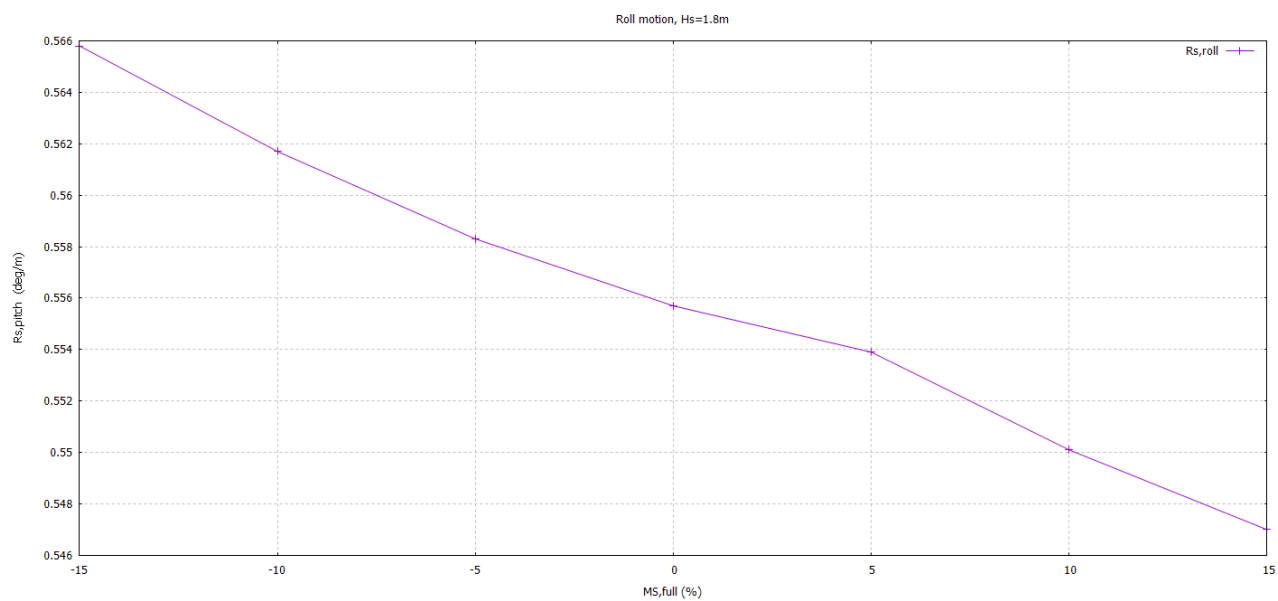
Slika 32. Utjecaj  $MS_{full}$  na RAO ljuľanja  $\eta_4$



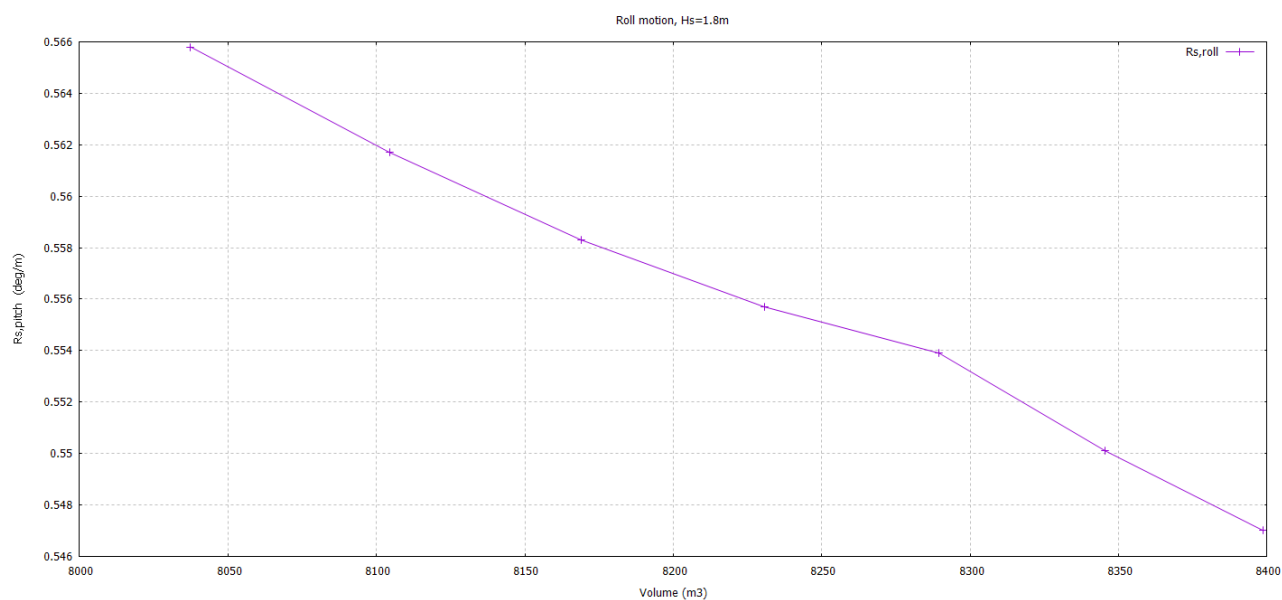
Slika 33. Utjecaj  $MS_{full}$  na RAO posrtanja  $\eta_5$

Kako se vidi sa Slika 32. i Slika 33., utjecaj koeficijenta  $MS_{full}$  na RAO funkcije je gotovo neznan.



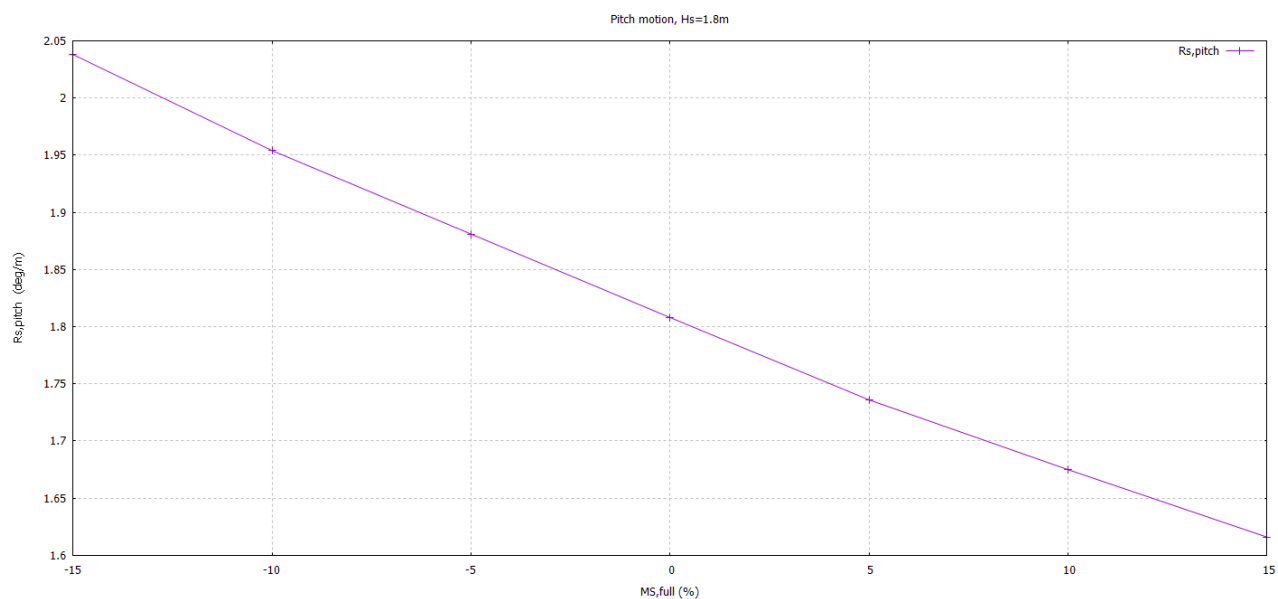


Slika 34. Utjecaj punoće gl. rebra  $MS_{full}$  na ljuľanje  $R_{S,\eta_4}$

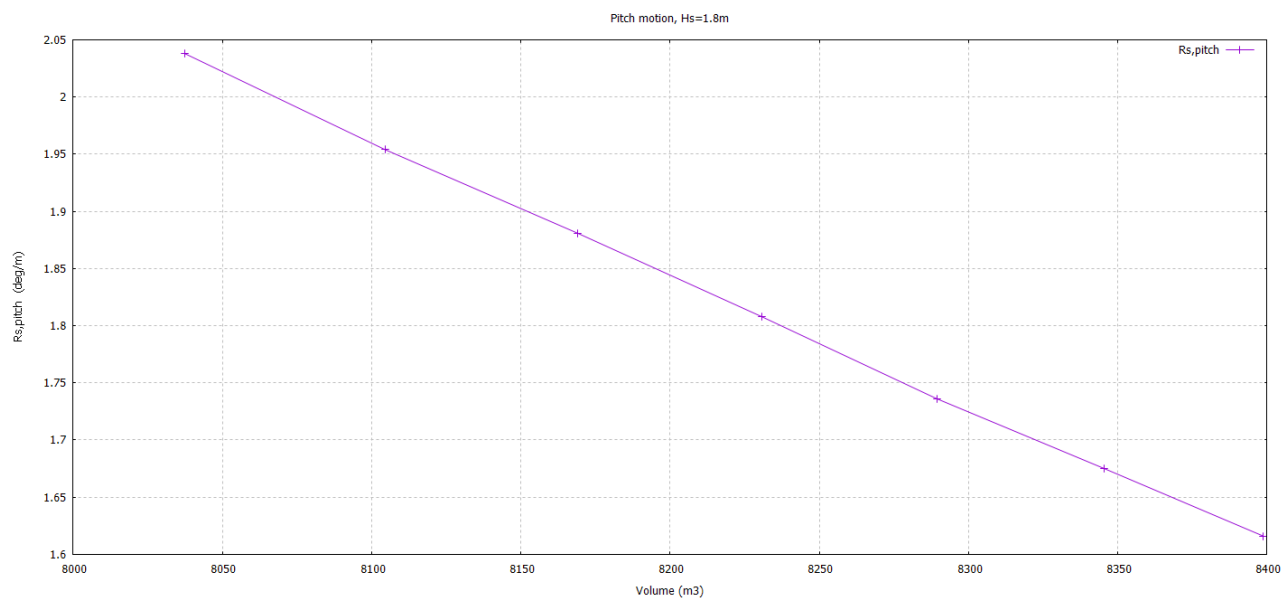


Slika 35. Utjecaj punoće gl. rebra  $MS_{full}$  na ljuľanje  $R_{S,\eta_4}$  u odnosu na volumen istisnine  $V$  (m³)

Kako se vidi iz dijagrama, Slika 34. i Slika 35., značajna valna amplituda ljuľjanja  $R_{S,\eta_4}$  opada proporcionalno s porastom punoće glavnog rebra, odnosno porastom volumena.



Slika 36. Utjecaj punoće gl. rebra  $MS_{full}$  na posrtanje  $R_{S,\eta5}$

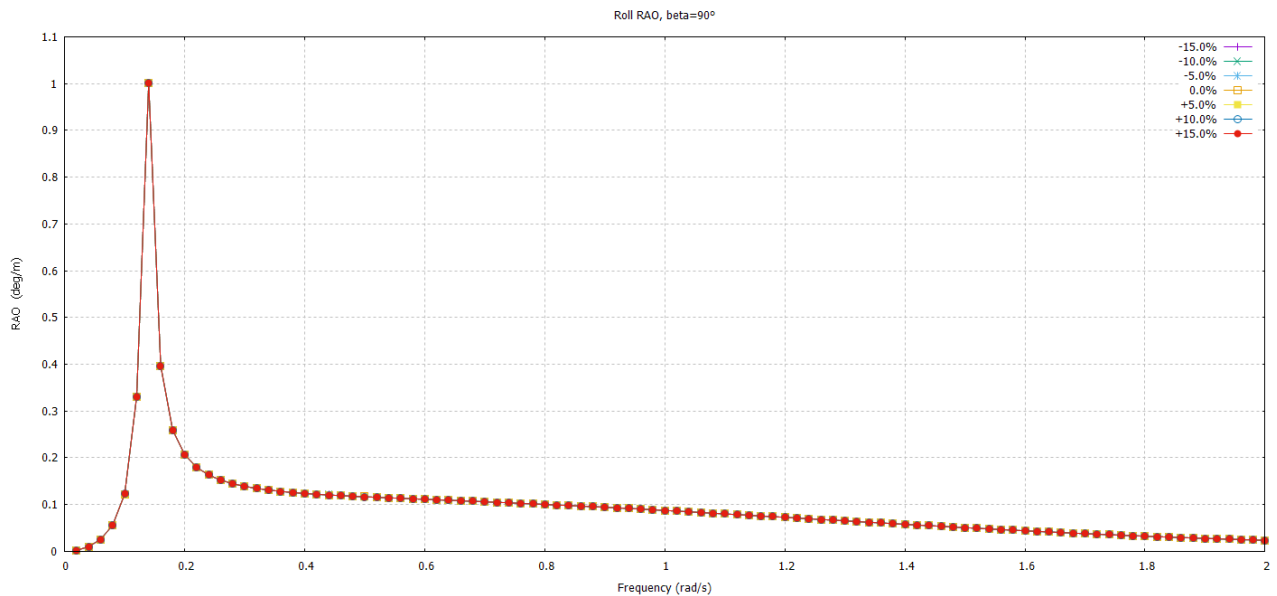


Slika 37. Utjecaj punoće gl. rebra  $MS_{full}$  na posrtanje  $R_{S,\eta5}$  u odnosu na volumen istisnine  $V$  (m<sup>3</sup>)

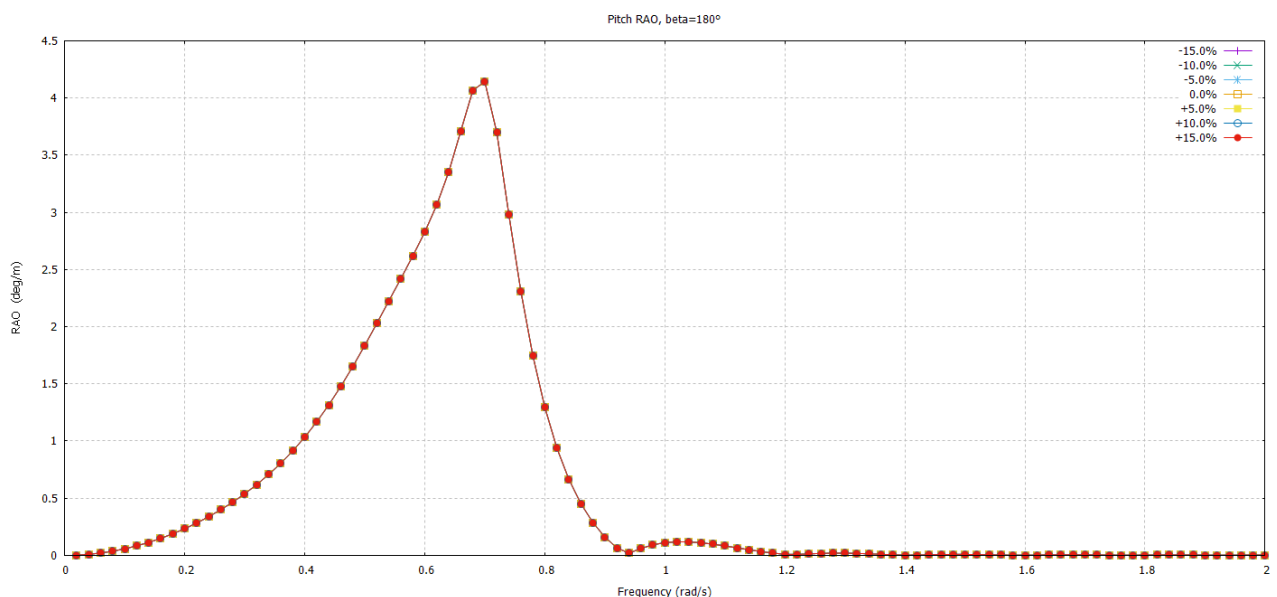
Kako se vidi iz dijagrama, Slika 36. i Slika 37., značajna valna amplituda posrtanja  $R_{S,\eta5}$  opada proporcionalno (gotovo linearno) s porastom punoće glavnog rebra, odnosno porastom volumena.

#### 4.6. Analiza utjecaja varijacije punoće krme $AFT_{full}$

Parametar koeficijent punoće krme  $AFT_{full}$  analitičke forme variran je u rasponu od -15% do +15% u odnosu na koeficijent punoće gl. rebra inicijalne forme koji iznosi  $AFT_{full}=0.1$ . Za svaku varijaciju forme proveden je proračun odziva ljuľjanja i posrtanja, te su prikazani rezultati u obliku dijagrama prijenosnih funkcija RAO, te značajne valne amplitude ljuľjanja odnosno posrtanja u ovisnosti o koef. punoće  $AFT_{full}$  odnosno volumenu. Na Slika 38. i Slika 39. prikazan je utjecaj varijacije koef.  $AFT_{full}$  na RAO prijenosne funkcije za valjanje i posrtanje.

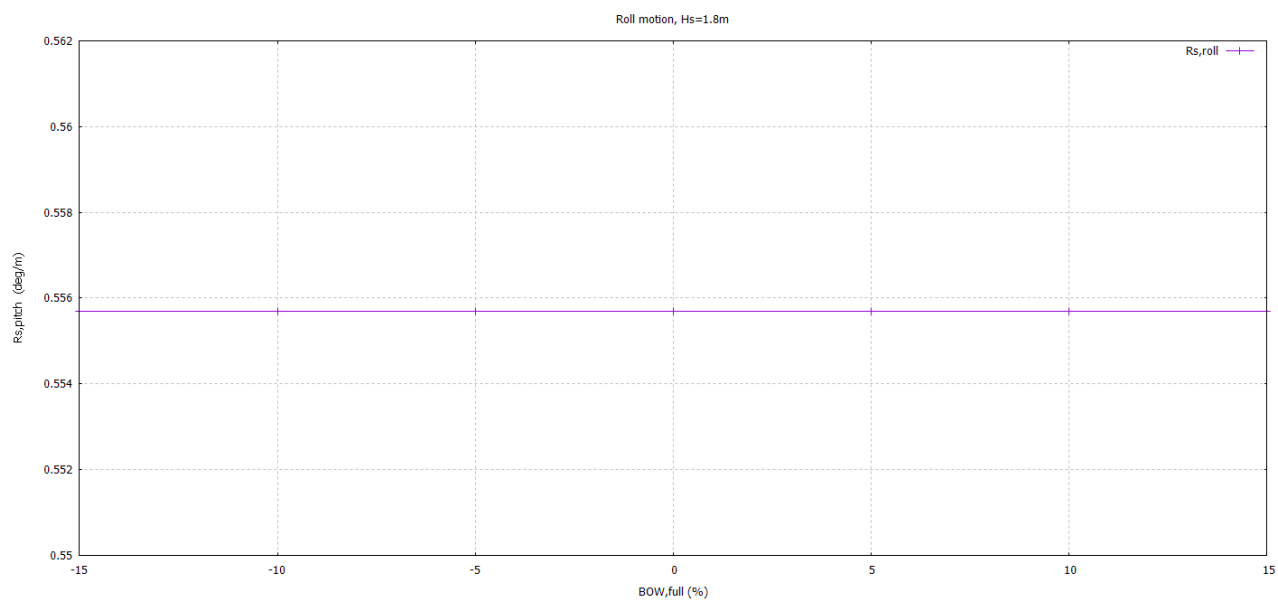


Slika 38. Utjecaj  $AFT_{full}$  na RAO ljuľjanja  $\eta_4$

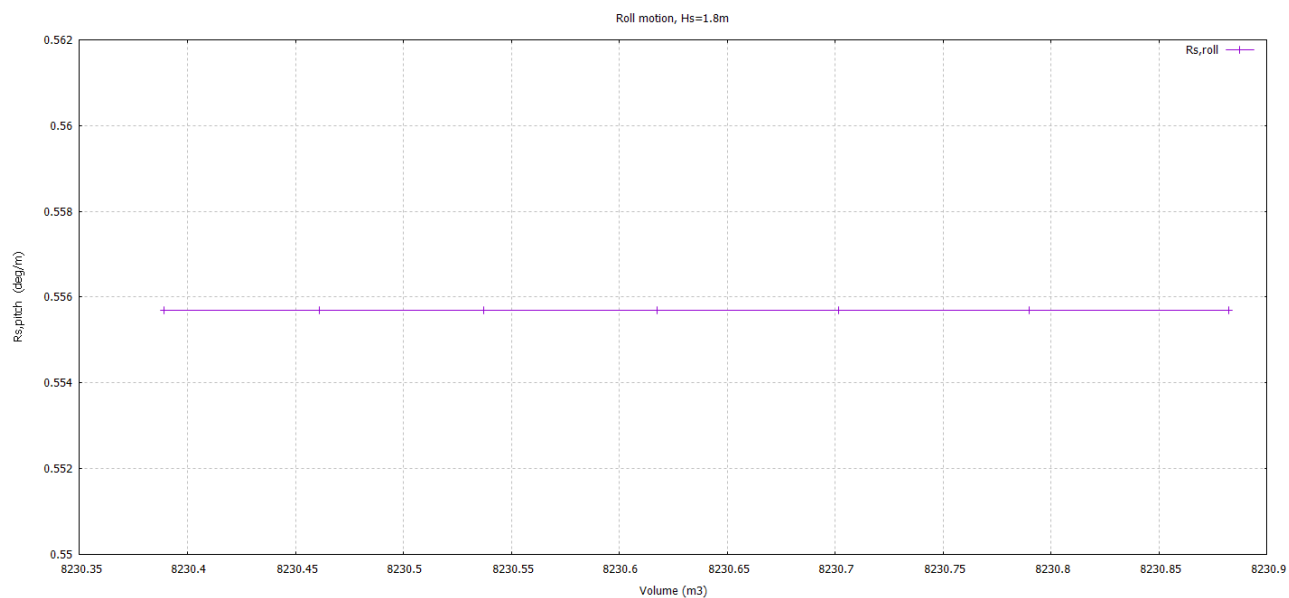


Slika 39. Utjecaj  $AFT_{full}$  na RAO posrtanja  $\eta_5$

Kako se vidi sa Slika 38. i Slika 39., utjecaj koeficijenta  $AFT_{full}$  na RAO funkcije je neznatan.

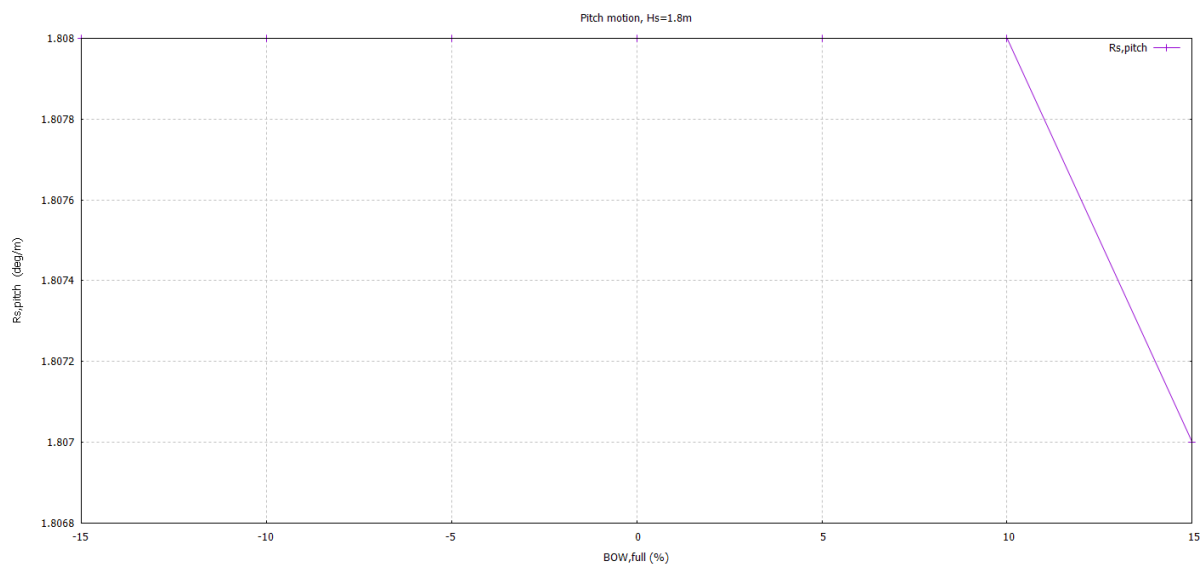


Slika 40. Utjecaj punoće krme  $AFT_{full}$  na ljuljanje  $R_{S,\eta_4}$

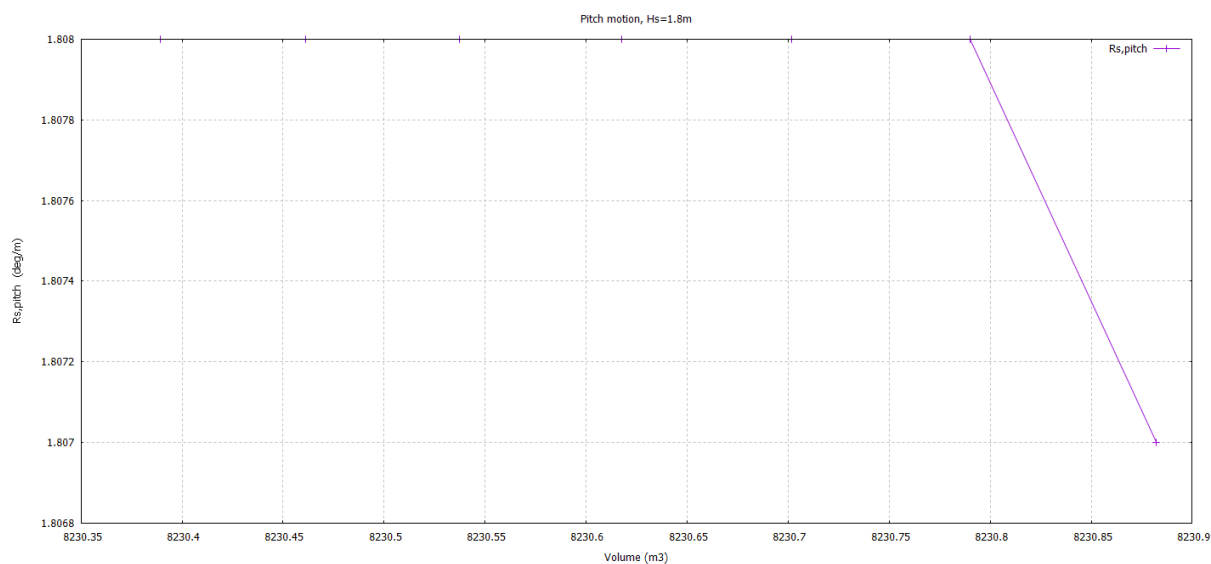


Slika 41. Utjecaj punoće krme  $AFT_{full}$  na ljuljanje  $R_{S,\eta_4}$  u odnosu na volumen istisnine  $V$  ( $m^3$ )

U skladu s RAO funkcijama varijacije koef. punoće krme  $AFT_{full}$  ne utječe na značajnu valnu amplitudu ljuljanja  $R_{S,\eta_4}$ , Slika 40. i Slika 41.



Slika 42. Utjecaj punoće krme  $AFT_{full}$  na posrtanje  $R_{S,\eta_5}$

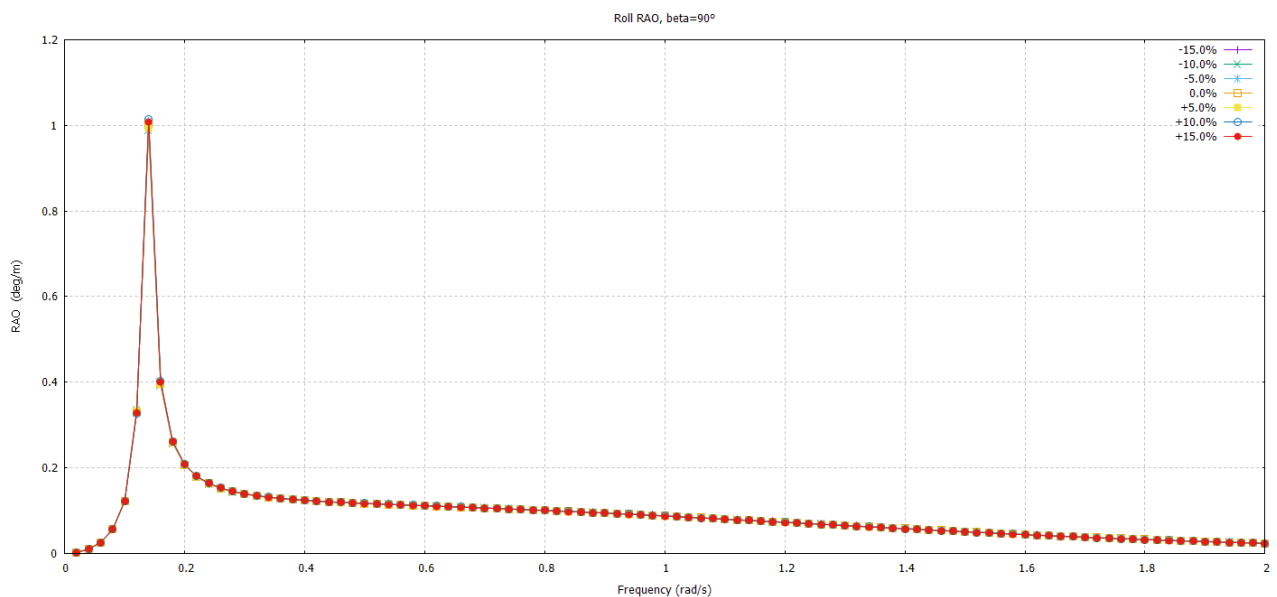


Slika 43. Utjecaj punoće krme  $AFT_{full}$  na posrtanje  $R_{S,\eta_5}$  u odnosu na volumen istisnine  $V$  (m<sup>3</sup>)

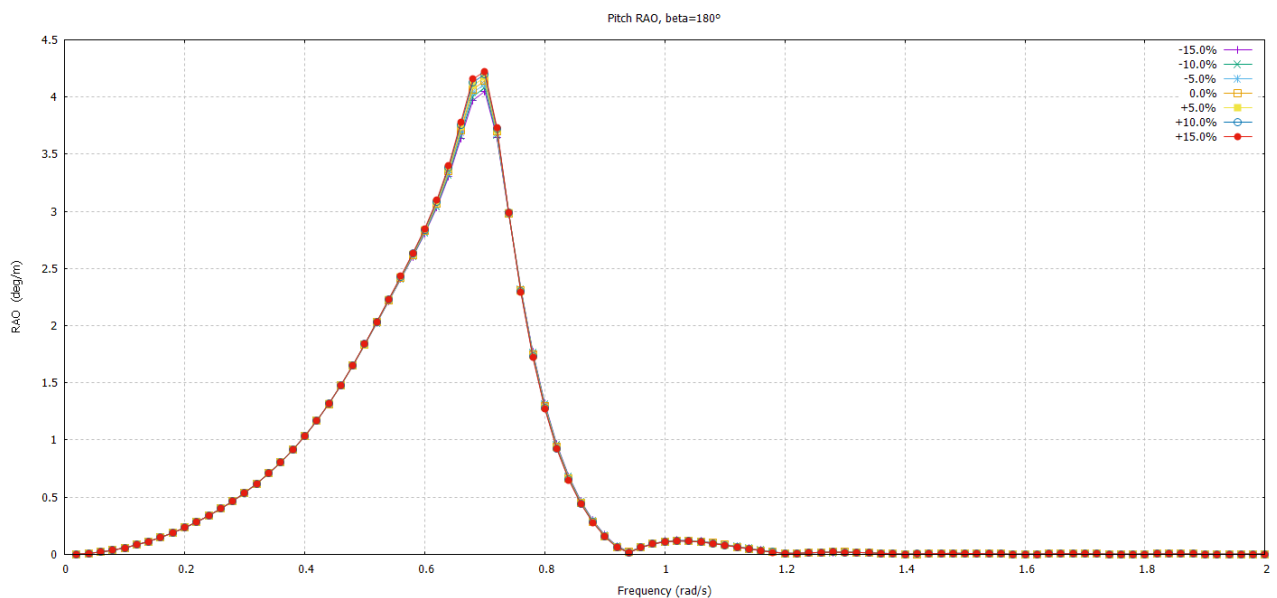
U skladu s RAO funkcijama varijacije koef. punoće krme  $AFT_{full}$  ne utječe na značajnu valnu amplitudu posrtanja  $R_{S,\eta_5}$ , Slika 42 i Slika 43.

#### 4.8. Analiza utjecaja varijacije punoće krmenog zrcala $TR_{full}$

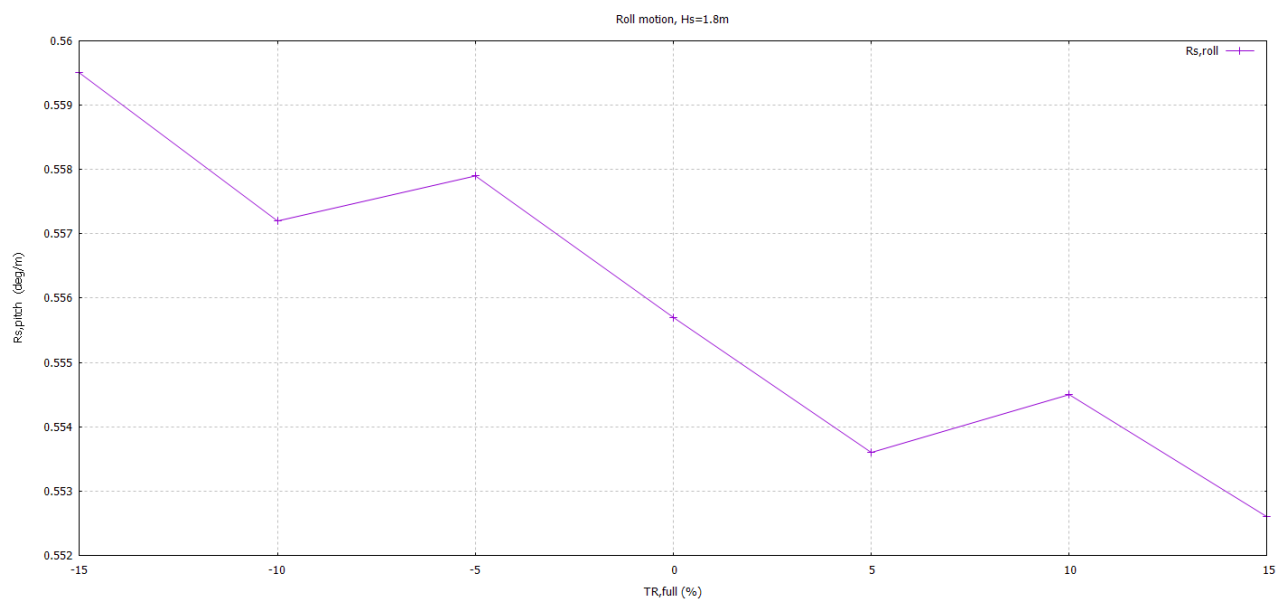
Parametar koeficijent punoće krmenog zrcala  $TR_{full}$  analitičke forme variran je u rasponu od -15% do +15% u odnosu na koeficijent punoće krmenog zrcala inicijalne forme koji iznosi  $TR_{full} = 0.8$ . Za svaku varijaciju forme proveden je proračun odziva ljuljanja i posrtanja, te su prikazani rezultati u obliku dijagrama prijenosnih funkcija RAO, te značajne valne amplitude ljuljanja odnosno posrtanja u ovisnosti o koef. punoće zrcala  $TR_{full}$  odnosno volumenu. Na Slika 44. i Slika 45. prikazan je utjecaj varijacije koef.  $TR_{full}$  na RAO prijenosne funkcije za valjanje i posrtanje.



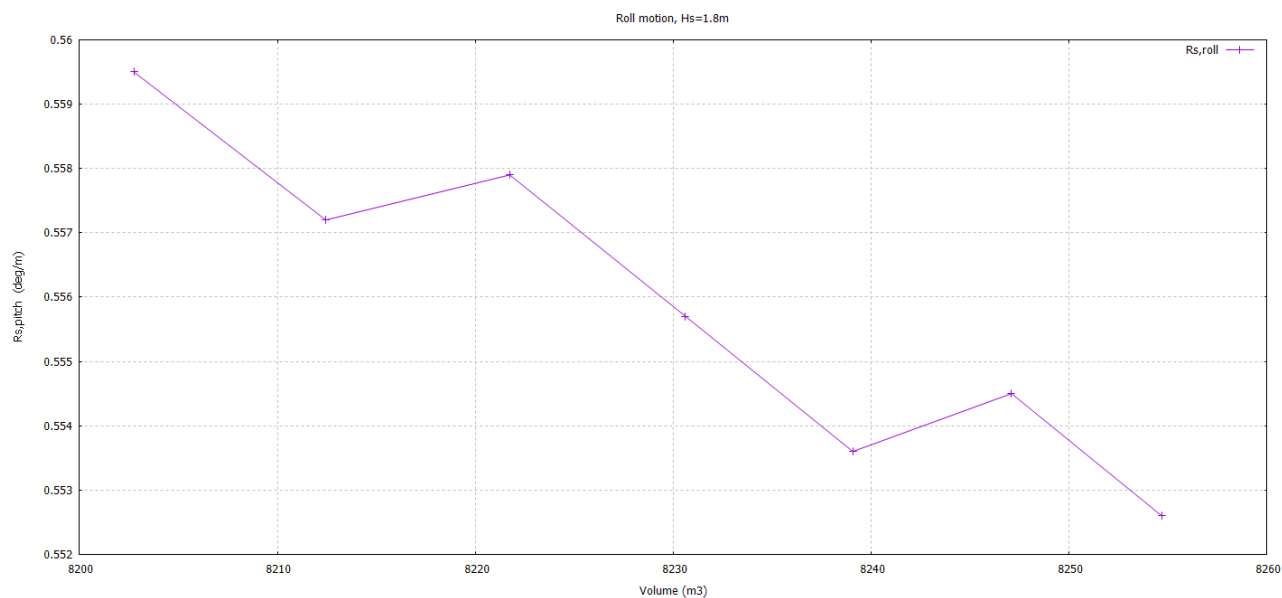
Slika 44. Utjecaj  $TR_{full}$  na RAO ljuljanja  $\eta_4$



Slika 45. Utjecaj  $TR_{full}$  na RAO posrtanja  $\eta_5$

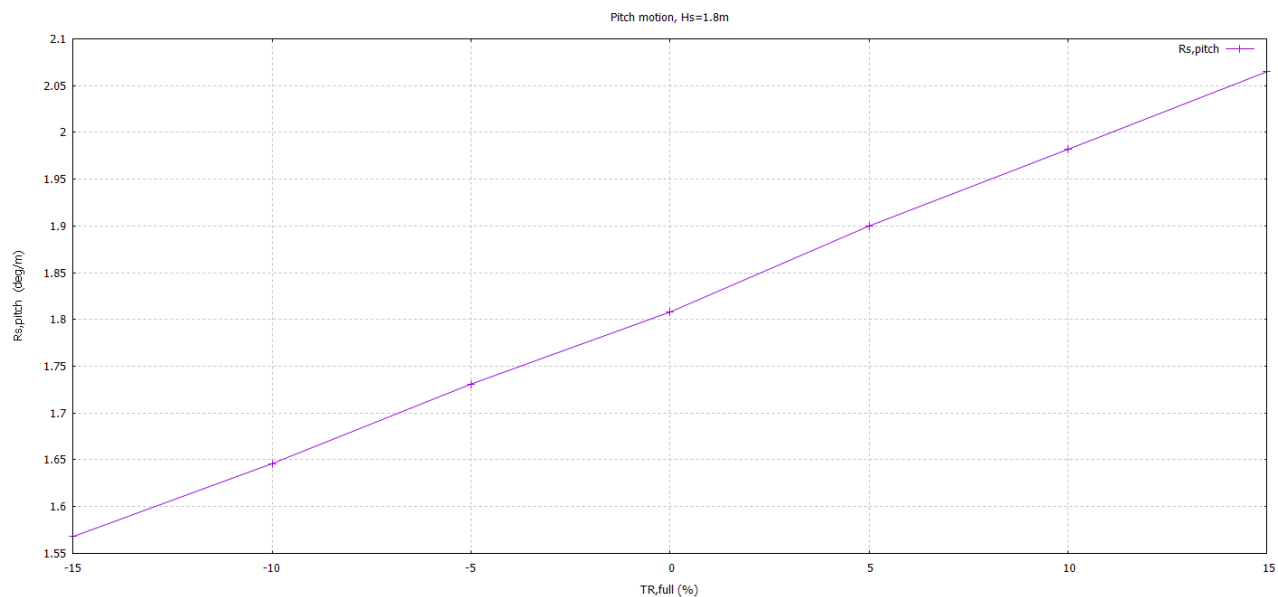


Slika 46. Utjecaj punoće zrcala  $TR_{full}$  na ljuljanje  $R_{S,\eta_4}$

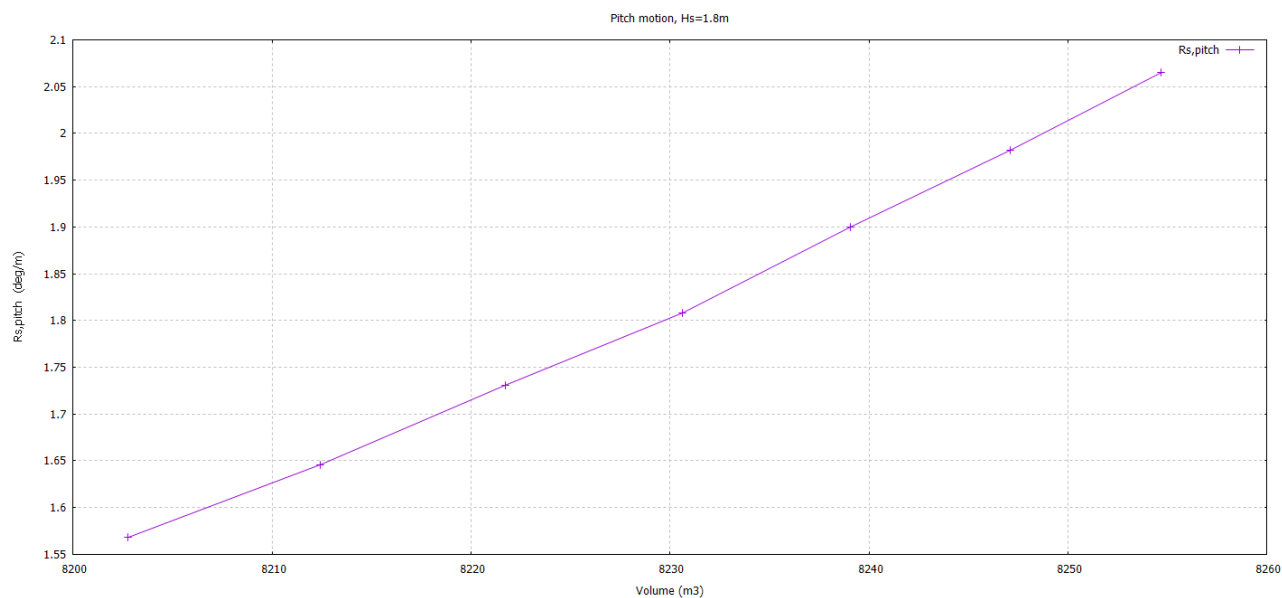


Slika 47. Utjecaj punoće zrcala  $TR_{full}$  na ljuljanje  $R_{S,\eta_4}$  u odnosu na volumen istisnine  $V$  (m<sup>3</sup>)

Kako se vidi iz dijagrama, Slika 46. i Slika 47., značajna valna amplituda ljuljanja  $R_{S,\eta_4}$  opada skokovito s porastom punoće krmenog zrcala, odnosno porastom volumena na krmi.



Slika 48. Utjecaj punoće zrcala  $TR_{full}$  na posrtanje  $R_{S,\eta5}$



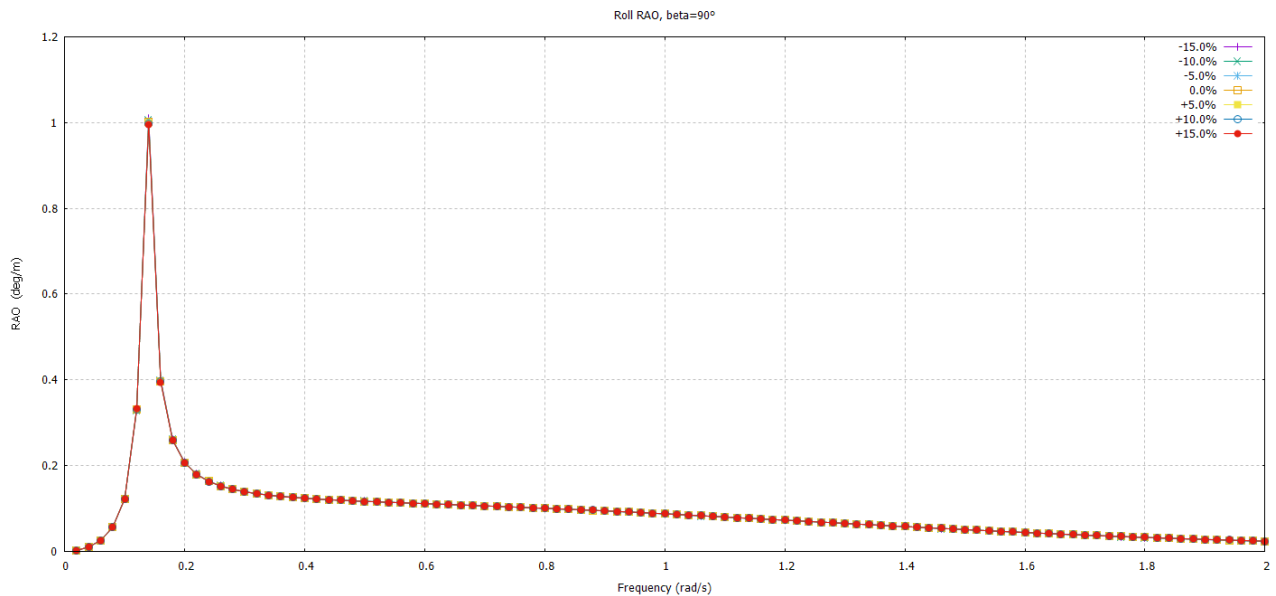
Slika 49. Utjecaj punoće zrcala  $TR_{full}$  na posrtanje  $R_{S,\eta5}$  u odnosu na volumen istisnine  $V$  ( $m^3$ )

Kako se vidi iz dijagrama, Slika 48. i Slika 49., značajna valna amplituda posrtanja  $R_{S,\eta5}$  raste proporcionalno s porastom punoće krmnog zrcala, odnosno porastom volumena na krmi.

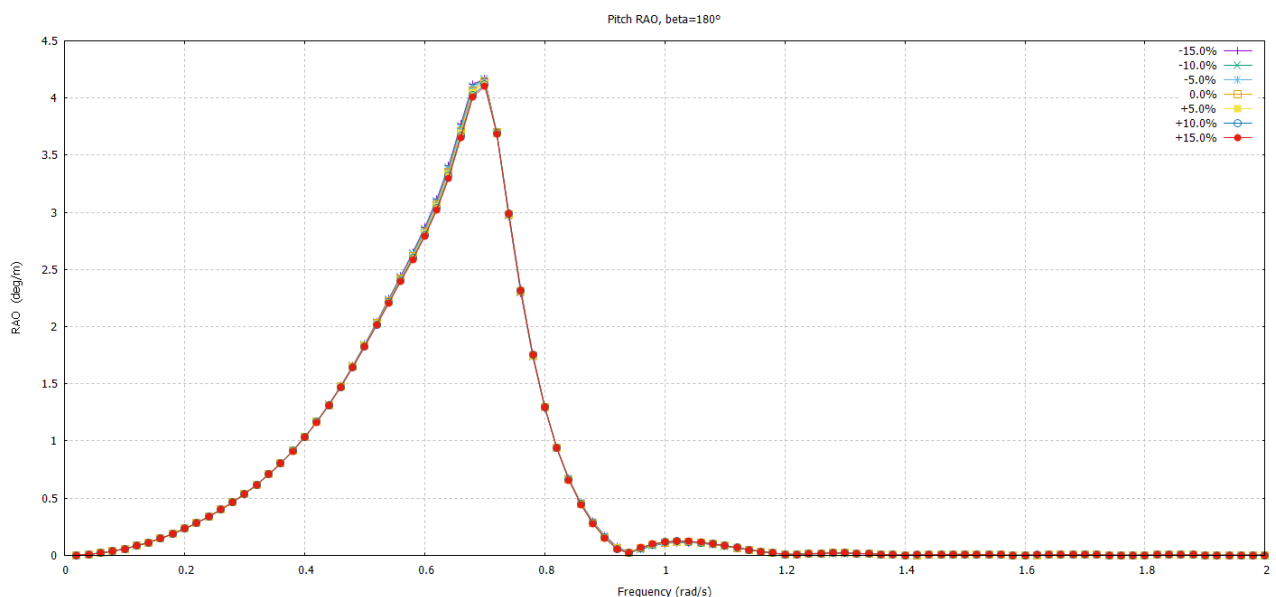


#### 4.7. Analiza utjecaja varijacije punoće pramca $FWD_{full}$

Parametar koeficijent punoće pramca  $FWD_{full}$  analitičke forme variran je u rasponu od -15% do +15% u odnosu na koeficijent punoće pramca inicijalne forme koji iznosi  $FWD_{full} = 1.5$ . Za svaku varijaciju forme proveden je proračun odziva ljuľjanja i posrtanja, te su prikazani rezultati u obliku dijagrama prijenosnih funkcija RAO, te značajne valne amplitude ljuľjanja odnosno posrtanja u ovisnosti o koef. punoće  $FWD_{full}$  odnosno volumenu. Na Slika 50. i Slika 51. prikazan je utjecaj varijacije koef.  $FWD_{full}$  na RAO prijenosne funkcije za valjanje i posrtanje.

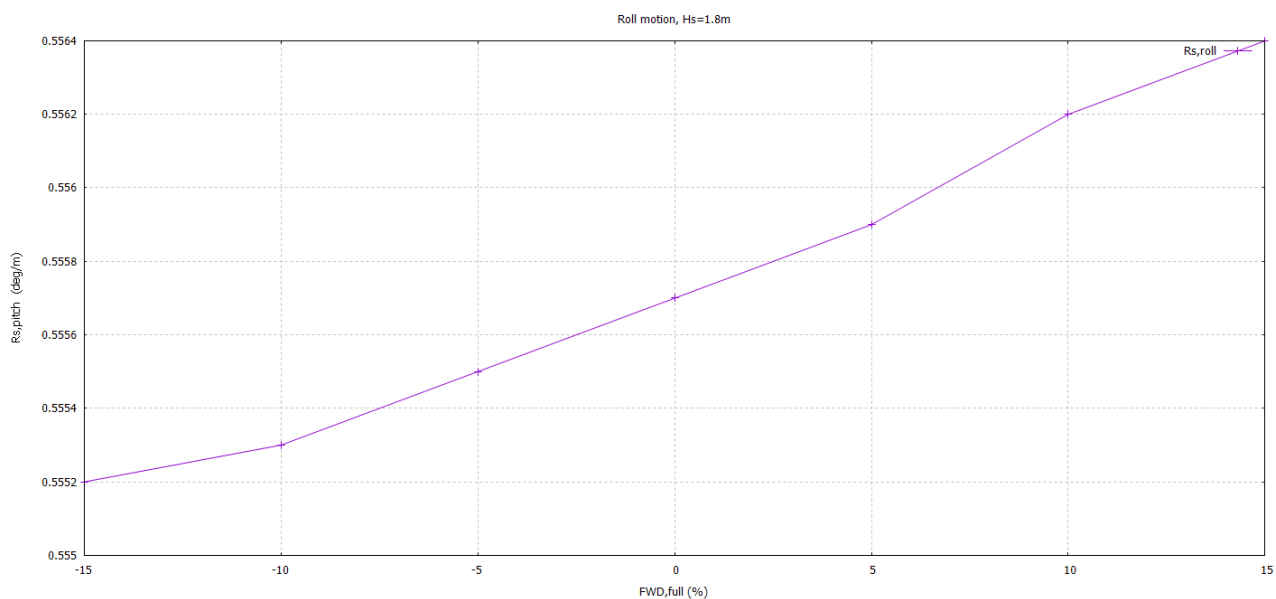


Slika 50. Utjecaj  $FWD_{full}$  na RAO ljuľjanja  $\eta_4$

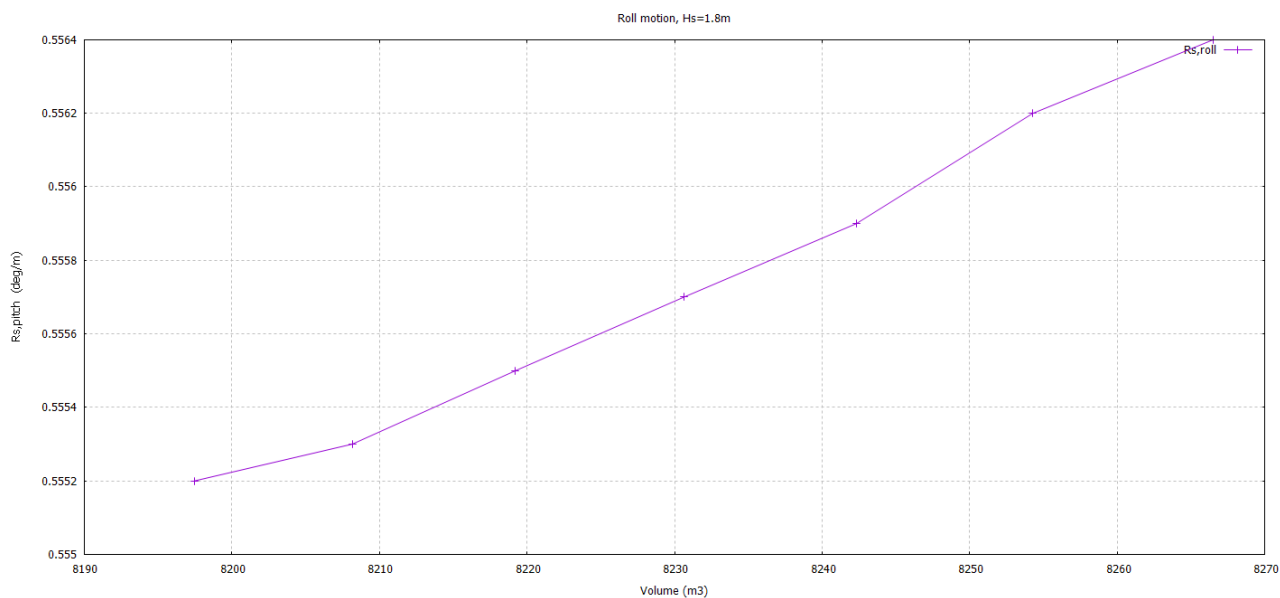


Slika 51. Utjecaj  $FWD_{full}$  na RAO posrtanja  $\eta_5$

Kako se vidi sa Slika 50. i Slika 51. utjecaj koeficijenta  $FWD_{full}$  na RAO funkcije je neznatan.

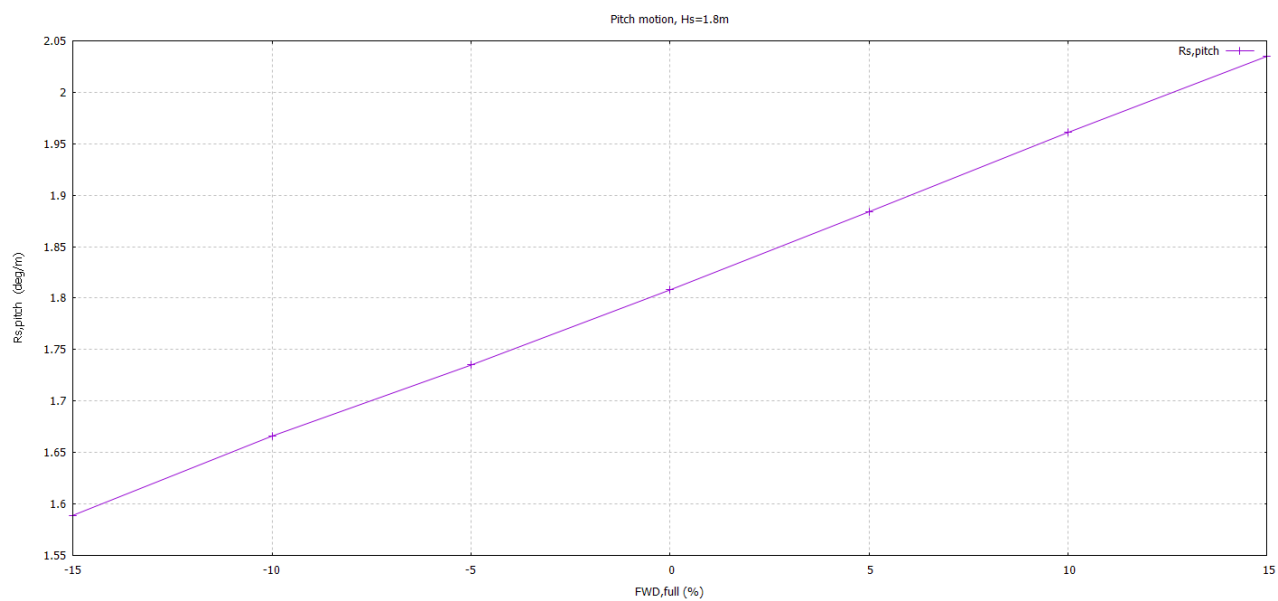


Slika 52. Utjecaj punoće pramca  $FWD_{full}$  na ljuľanje  $R_{S,\eta_4}$

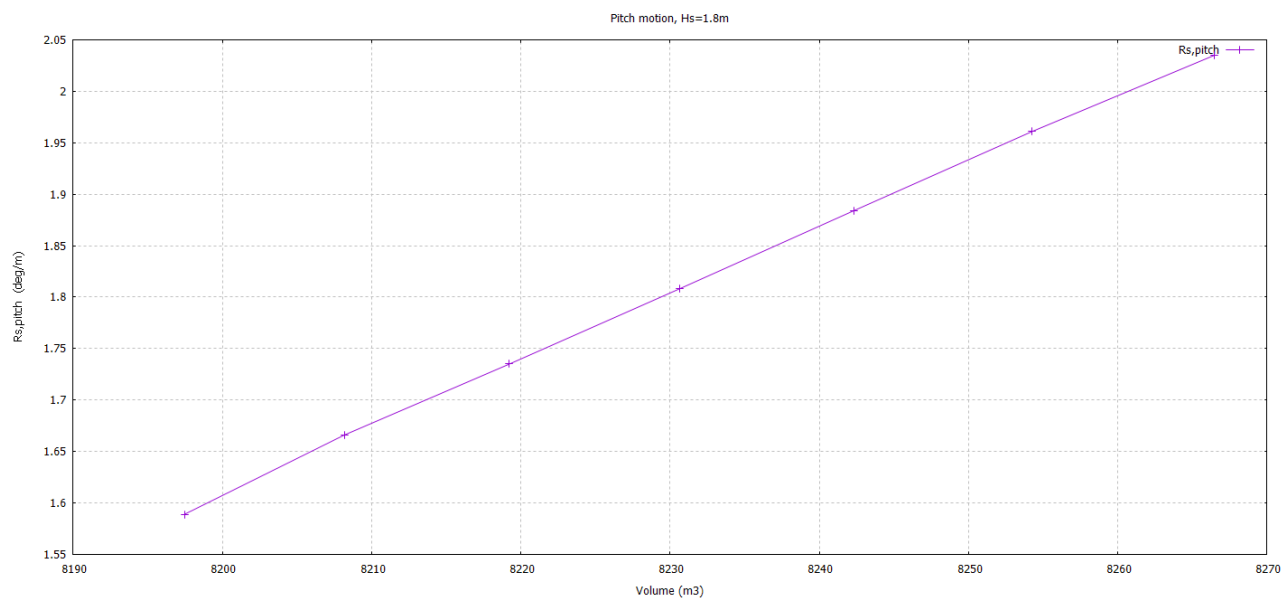


Slika 53. Utjecaj punoće pramca  $FWD_{full}$  na ljuľanje  $R_{S,\eta_4}$  u odnosu na volumen istisnine  $V$  ( $m^3$ )

Iako prikazani dijagrami, Slika 52. i Slika 53., pokazuju trend rasta značajne amplitude ljuľjanja porastom punoće pramca odnosno volumena, ta promjena nije značajna jer to porast od  $0.5552^\circ$  do  $0.5564^\circ$  s korakom porasta reda veličine  $10^{-4}$ .



Slika 54. Utjecaj punoće pramca  $FWD_{full}$  na posrtanje  $R_{S,\eta5}$

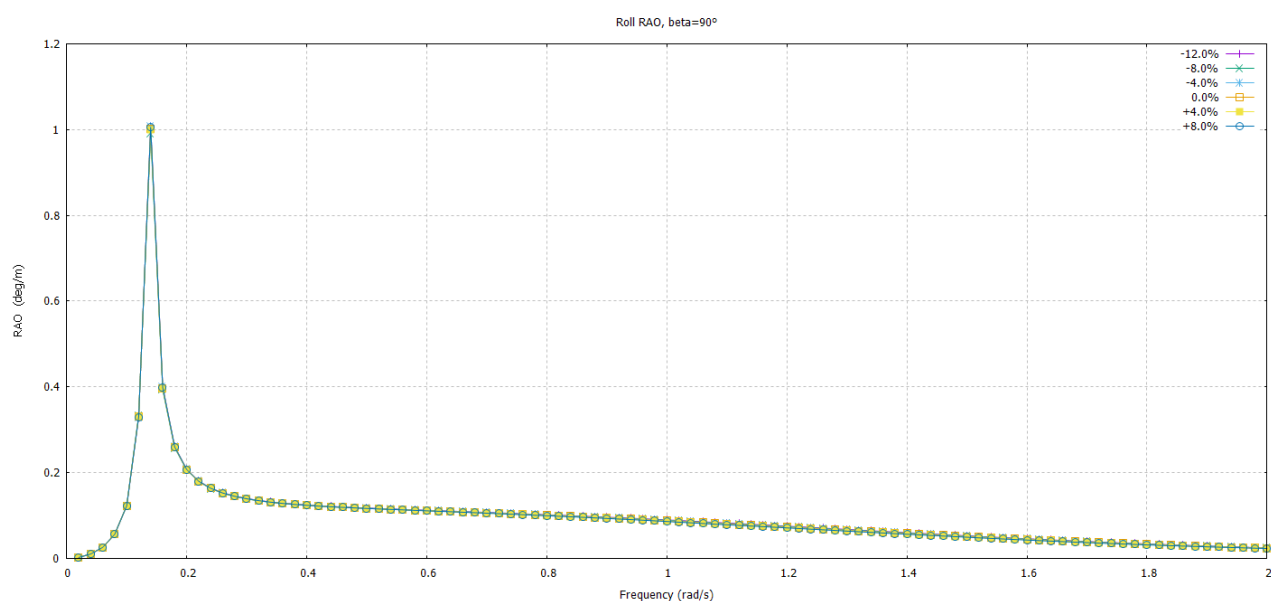


Slika 55. Utjecaj punoće pramca  $FWD_{full}$  na posrtanje  $R_{S,\eta5}$  u odnosu na volumen istisnine  $V$  ( $\text{m}^3$ )

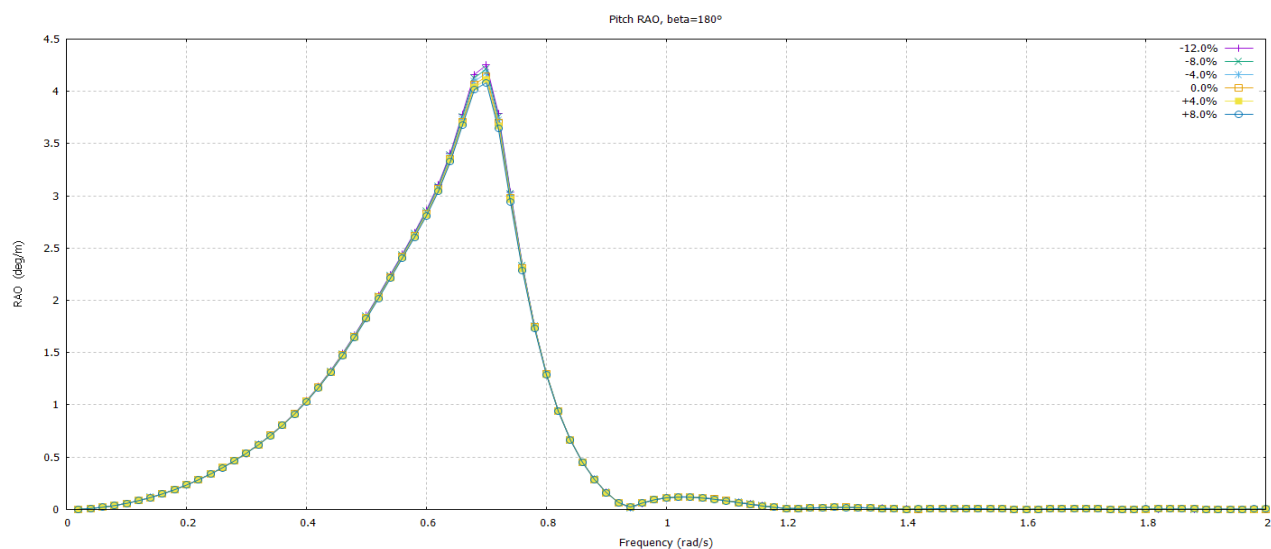
Kako je uočljivo sa Slika 54. i Slika 55., povećanjem punoće pramca povećava se značajna amplituda posrtanja  $R_{S,\eta5}$ .

#### 4.9. Analiza utjecaja varijacije širine krmenog zrcala $TB$

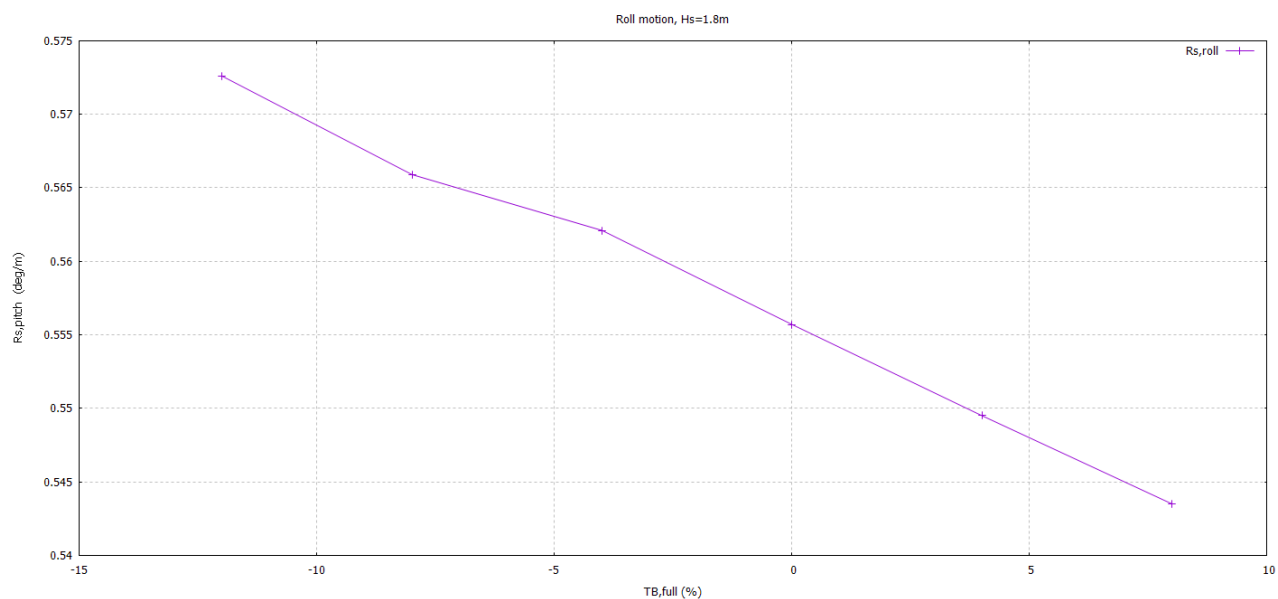
Parametar širine krmenog zrcala  $TB$  predstavlja koeficijent koji je definiran kao omjer širine gl. rebra i širine zrcala, a variran je u rasponu od -12% do +8% u odnosu na koeficijent širine zrcala  $TB$  inicijalne forme koji iznosi  $TB = 0.9$ . Za svaku varijaciju forme proveden je proračun odziva ljujanja i posrtanja, te su prikazani rezultati u obliku dijagrama prijenosnih funkcija RAO, te značajne valne amplitude ljujanja odnosno posrtanja u ovisnosti o koef. širine zrcala  $TB$  odnosno volumenu. Na Slika 56. i Slika 57 Slika 33. prikazan je utjecaj varijacije koef.  $TB$  na RAO prijenosne funkcije za valjanje i posrtanje.



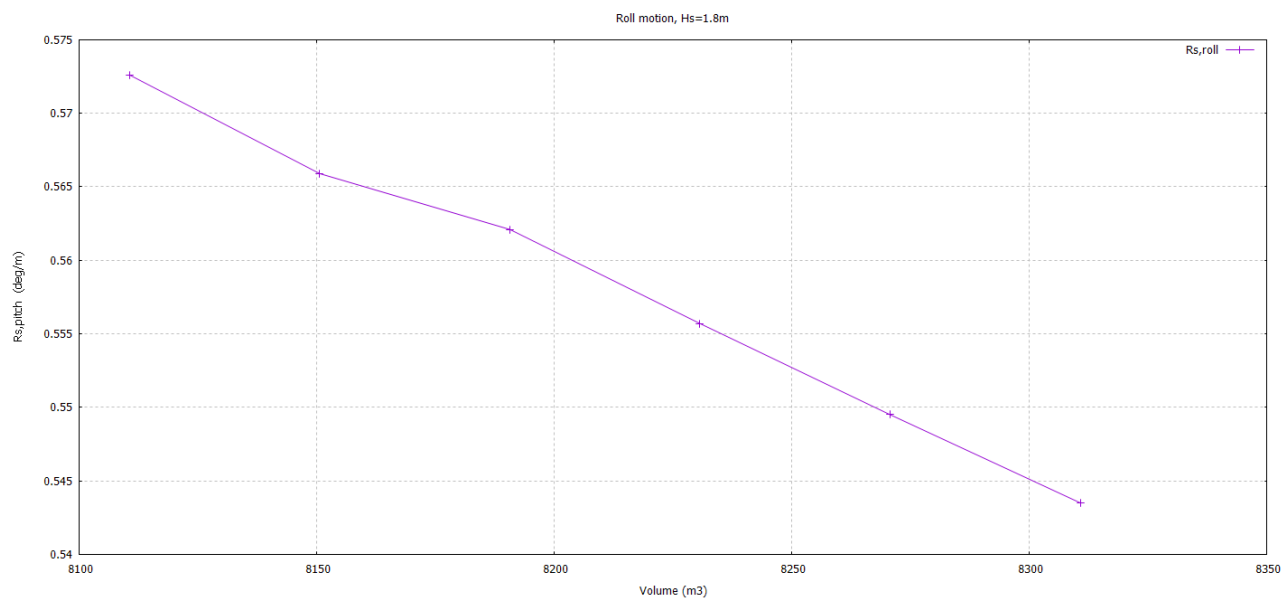
Slika 56. Utjecaj  $TB$  na RAO ljujanja  $\eta_4$



Slika 57. Utjecaj  $TB$  na RAO posrtanja  $\eta_5$

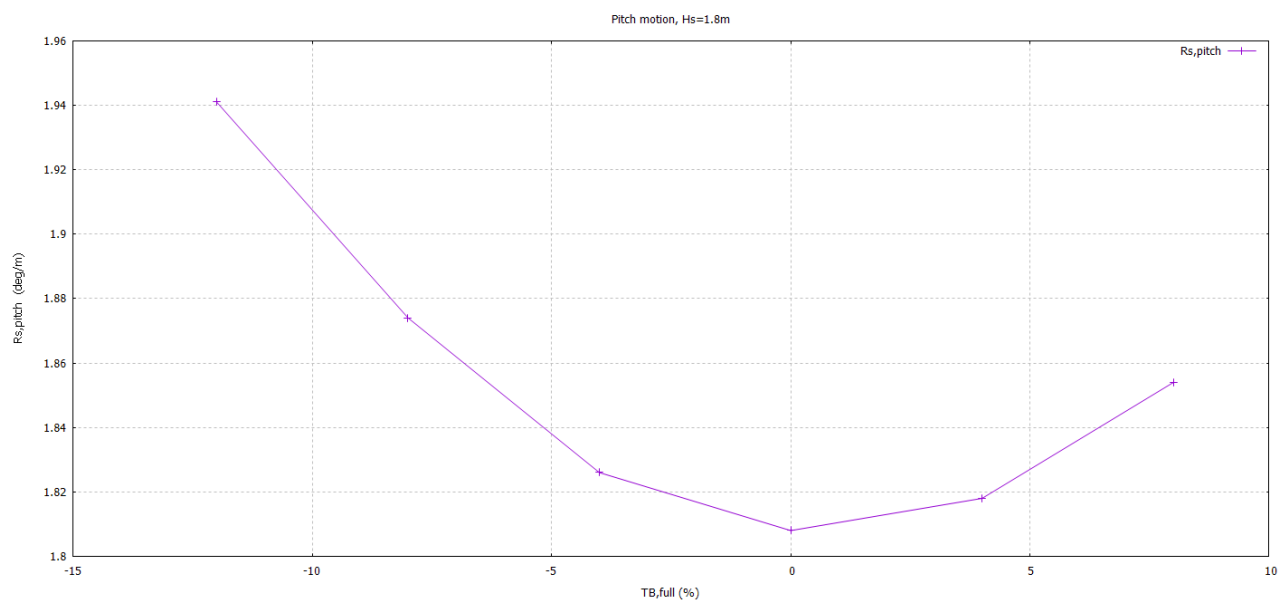


Slika 58. Utjecaj širine zrcala  $TB$  na ljuľjanje  $R_{S,\eta 4}$

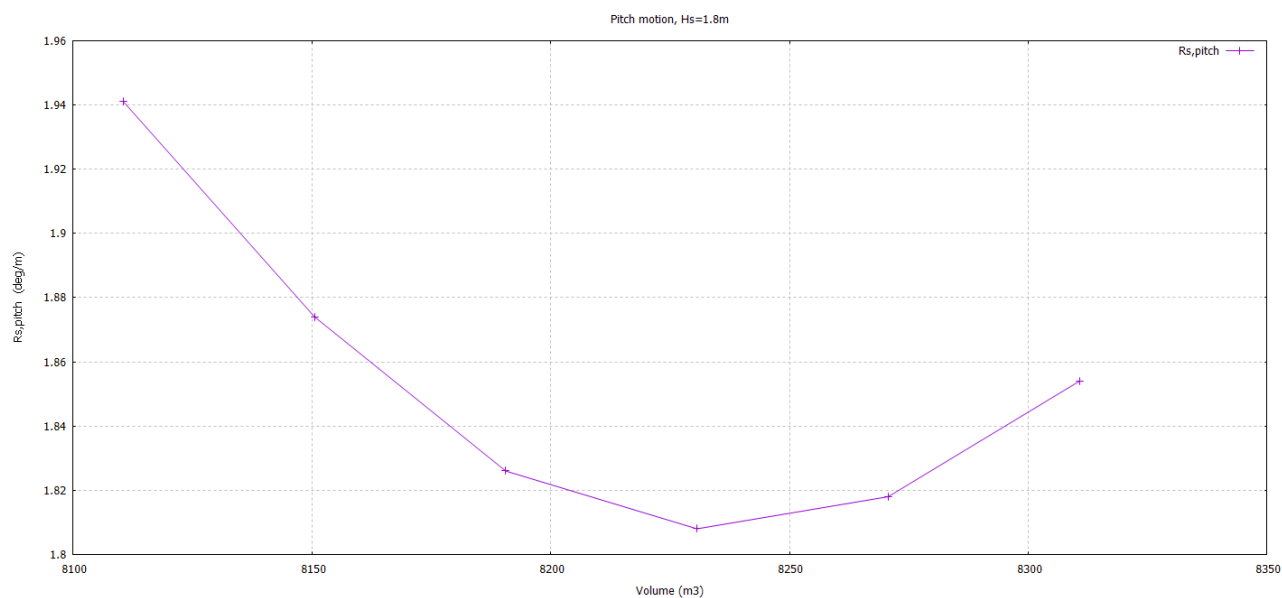


Slika 59. Utjecaj širine zrcala  $TB$  na ljuľjanje  $R_{S,\eta 4}$  u odnosu na volumen istisnine  $V$  (m³)

Kako se vidi iz dijagrama, Slika 58. i Slika 59., značajna valna amplituda ljuľjanja  $R_{S,\eta 4}$  opada s povećanjem širine krmenog zrcala, odnosno porastom volumena na krmi.



Slika 60. Utjecaj širine zrcala  $TB$  na posrtanje  $R_{S,\eta_5}$

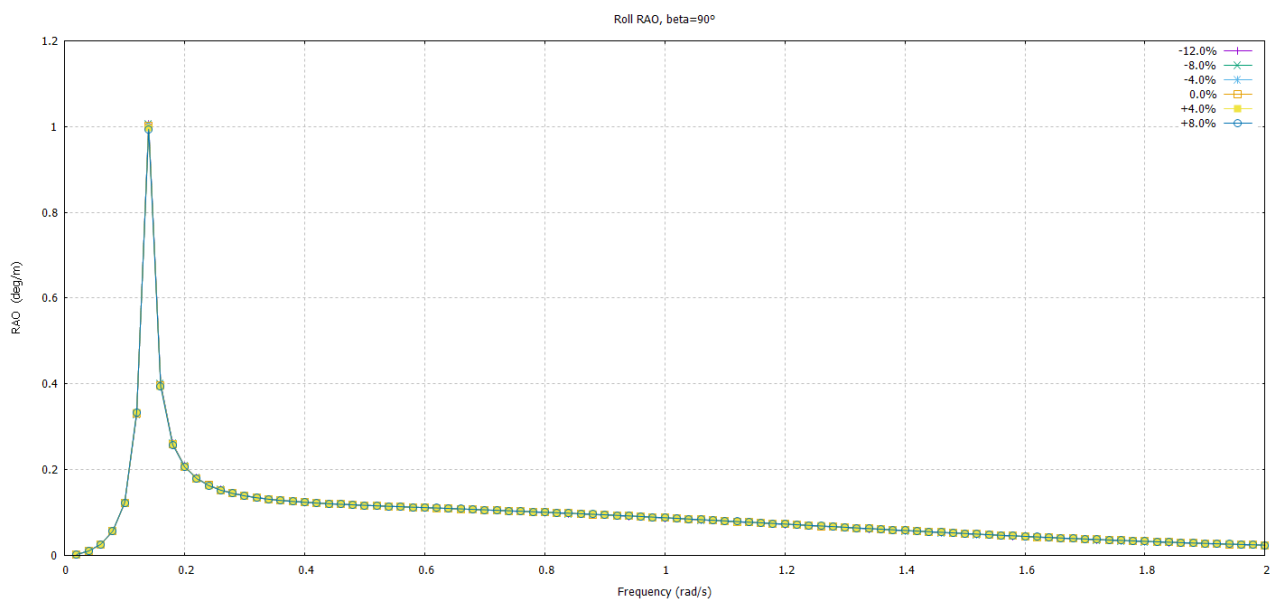


Slika 61. Utjecaj širine zrcala  $TB$  na posrtanje  $R_{S,\eta_5}$  u odnosu na volumen istisnine  $V$  (m<sup>3</sup>)

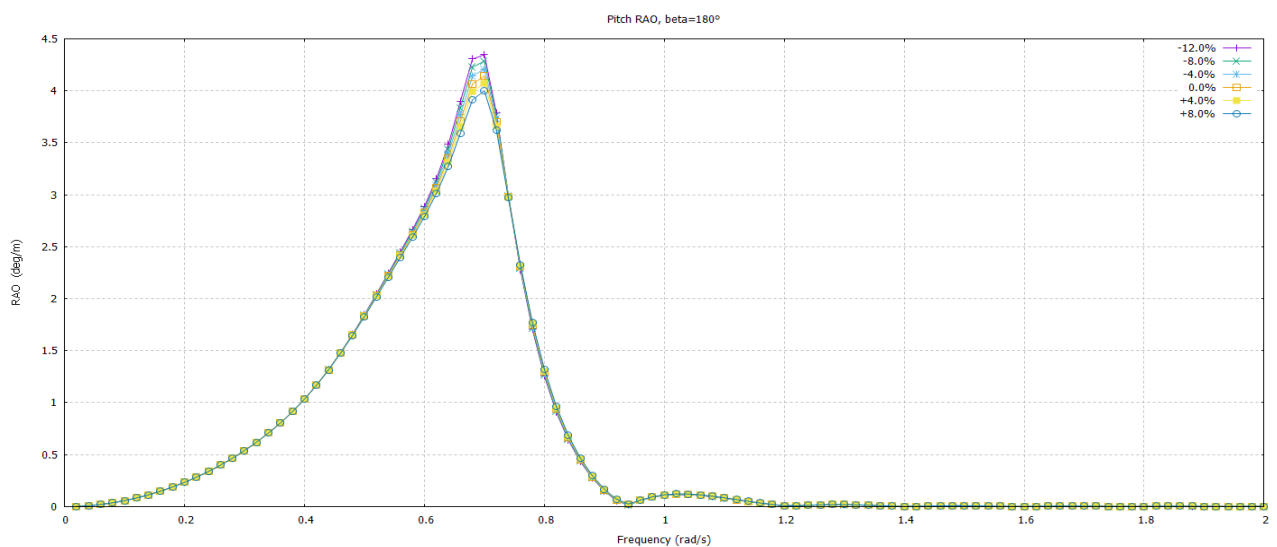
Kako se vidi iz dijagrama, Slika 60. i Slika 61., značajna valna amplituda posrtanja  $R_{S,\eta_5}$  raste proporcionalno s porastom punoće krmenog zrcala, odnosno porastom volumena na krmi.

#### 4.10. Analiza utjecaja varijacije visine krmenog zrcala $TD$

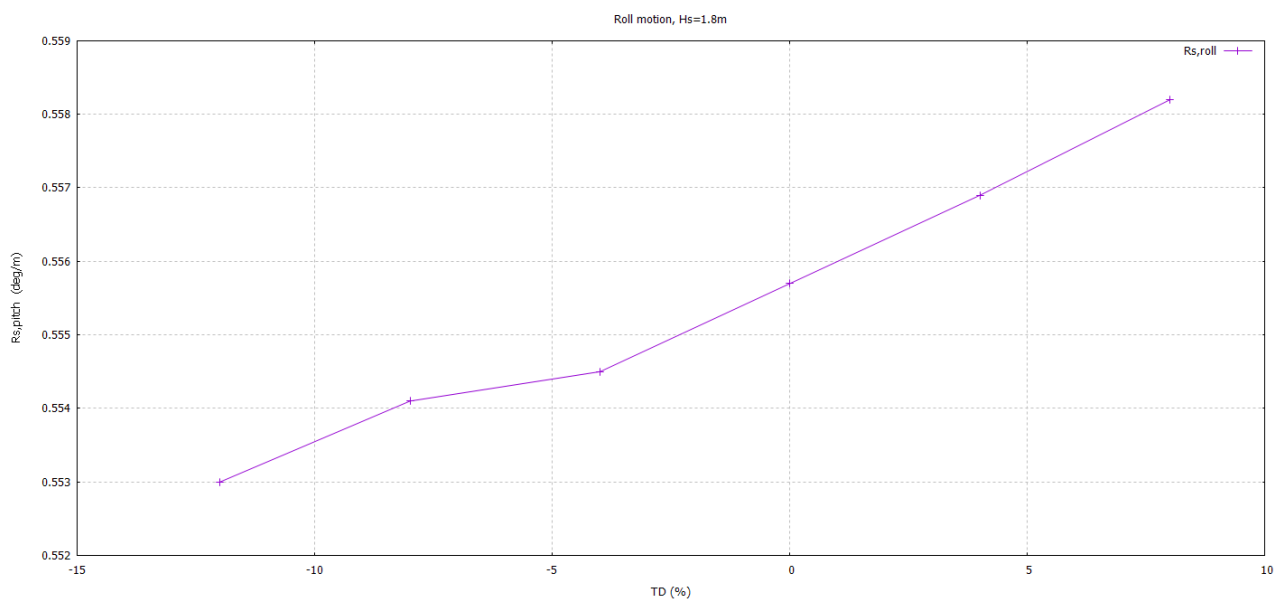
Parametar visine krmenog zrcala  $TD$  predstavlja koeficijent koji je definiran kao omjer visine gaza  $D$  i visine donje točke krmenog zrcala, a variran je u rasponu od -12% do +8% u odnosu na koeficijent visine zrcala  $TD$  inicijalne forme koji iznosi  $TD = 0.8$ . Za svaku varijaciju forme proveden je proračun odziva ljuľjanja i posrtanja, te su prikazani rezultati u obliku dijagrama prijenosnih funkcija RAO, te značajne valne amplitude ljuľjanja odnosno posrtanja u ovisnosti o koef. visine zrcala  $TD$  odnosno volumenu. Na Slika 62. i Slika 63. prikazan je utjecaj varijacije koef.  $TD$  na RAO prijenosne funkcije za valjanje i posrtanje.



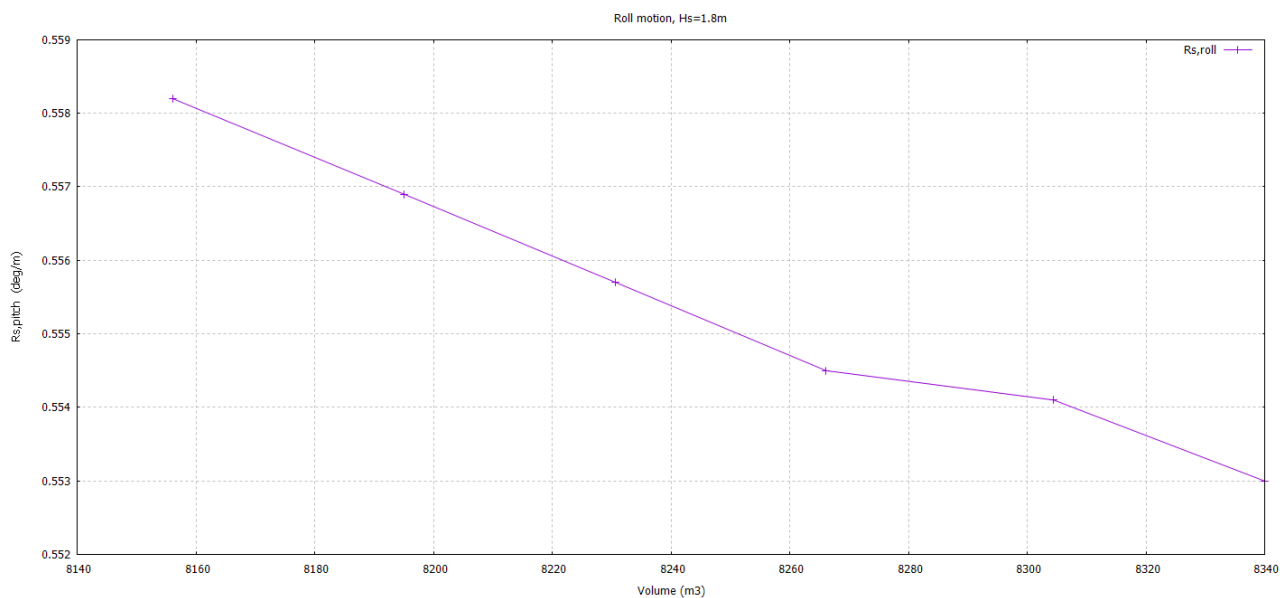
Slika 62. Utjecaj  $TD$  na RAO ljuľjanja  $\eta_4$



Slika 63. Utjecaj  $TD$  na RAO posrtanja  $\eta_5$



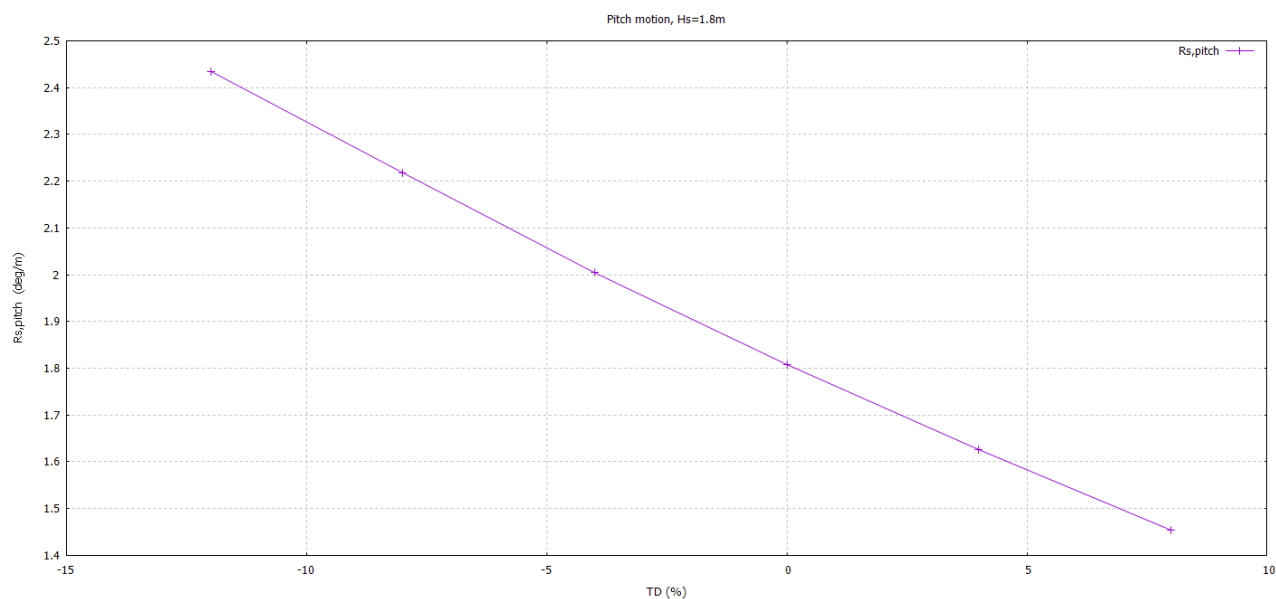
Slika 64. Utjecaj visine zrcala  $TD$  na ljujanje  $R_{S,\eta_4}$



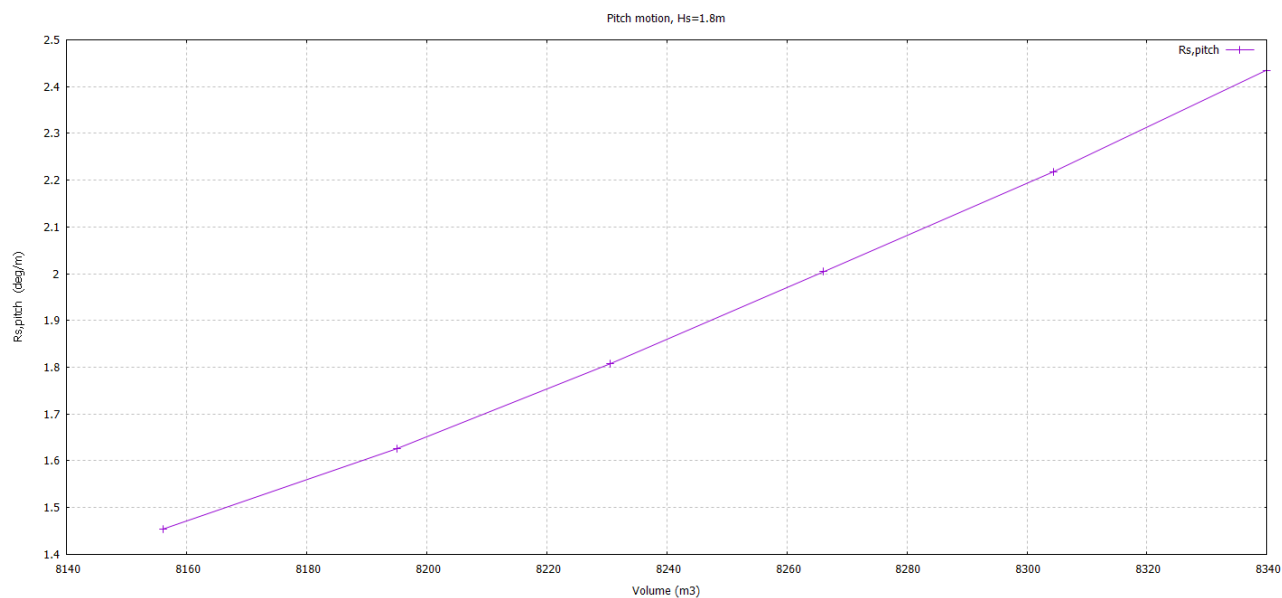
Slika 65. Utjecaj visine zrcala  $TD$  na ljujanje  $R_{S,\eta_4}$  u odnosu na volumen istisnine  $V$  ( $m^3$ )

Kako se vidi iz dijagrama, Slika 64. i Slika 65., značajna valna amplituda ljujanja  $R_{S,\eta_4}$  raste s povećanjem visine krmenog zrcala, odnosno smanjenjem volumena na krmi.





Slika 66. Utjecaj visine zrcala  $TD$  na posrtanje  $R_{S,\eta_5}$

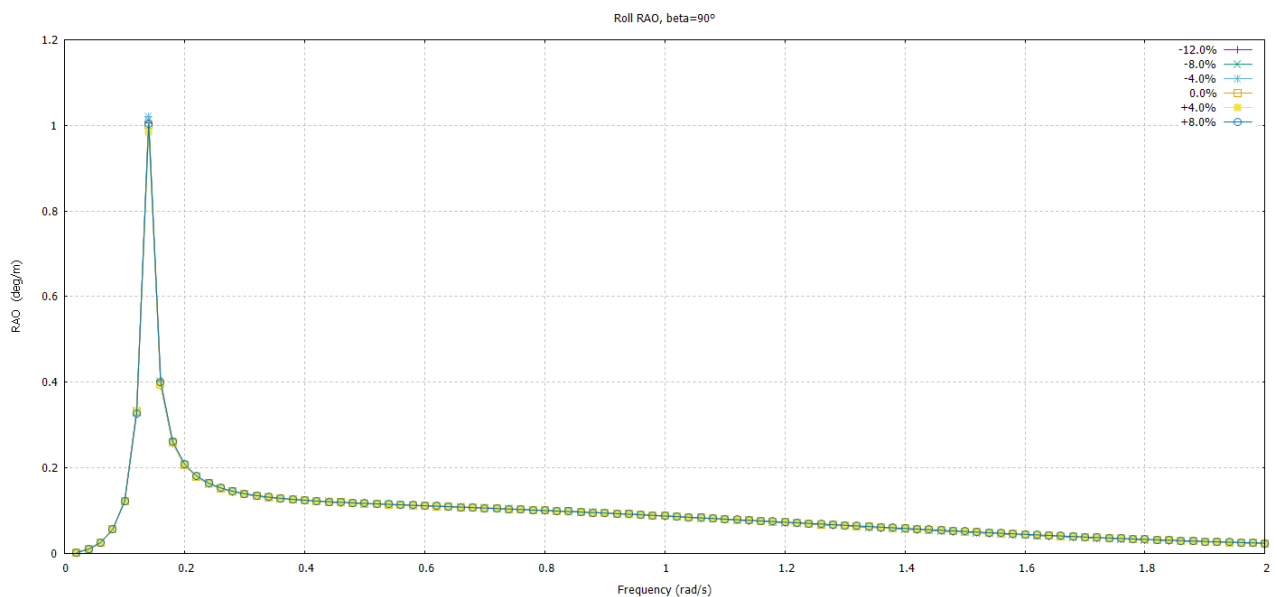


Slika 67. Utjecaj visine zrcala  $TD$  na posrtanje  $R_{S,\eta_4}$  u odnosu na volumen istisnine  $V$  (m<sup>3</sup>)

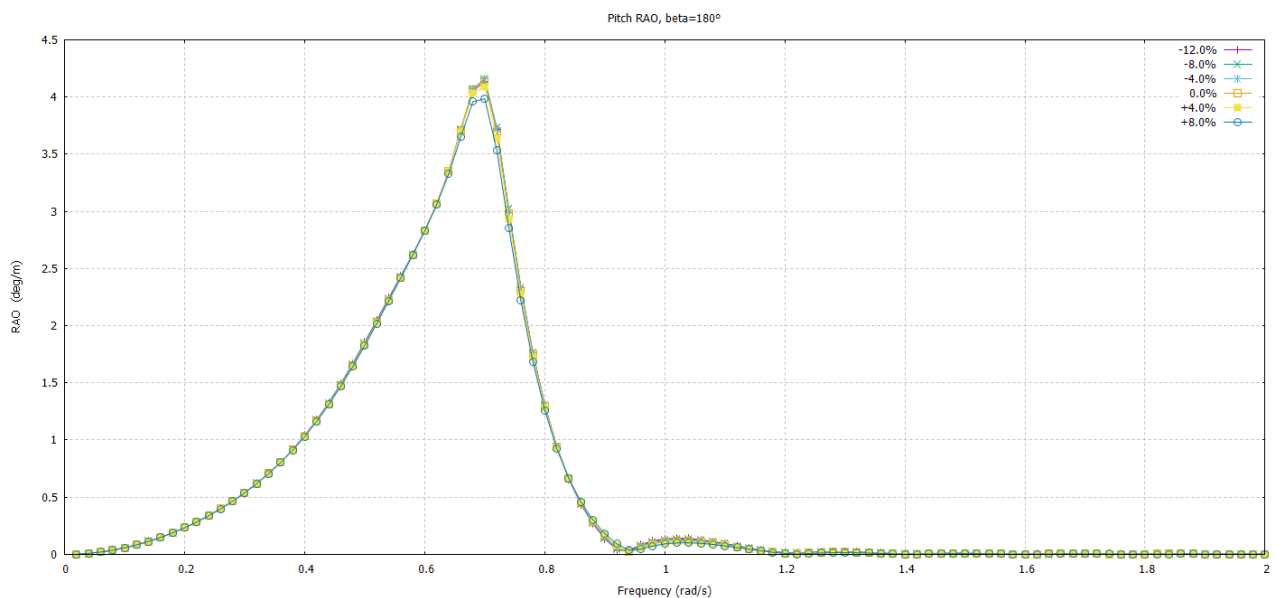
Kako se vidi iz dijagrama, Slika 66. i Slika 67., značajna valna amplituda posrtanja  $R_{S,\eta_5}$  opada proporcionalno s porastom visine krmenog zrcala, odnosno raste proporcionalno s porastom volumena na krmu.

#### 4.11. Analiza utjecaja varijacije pozicije pramca *FWK*

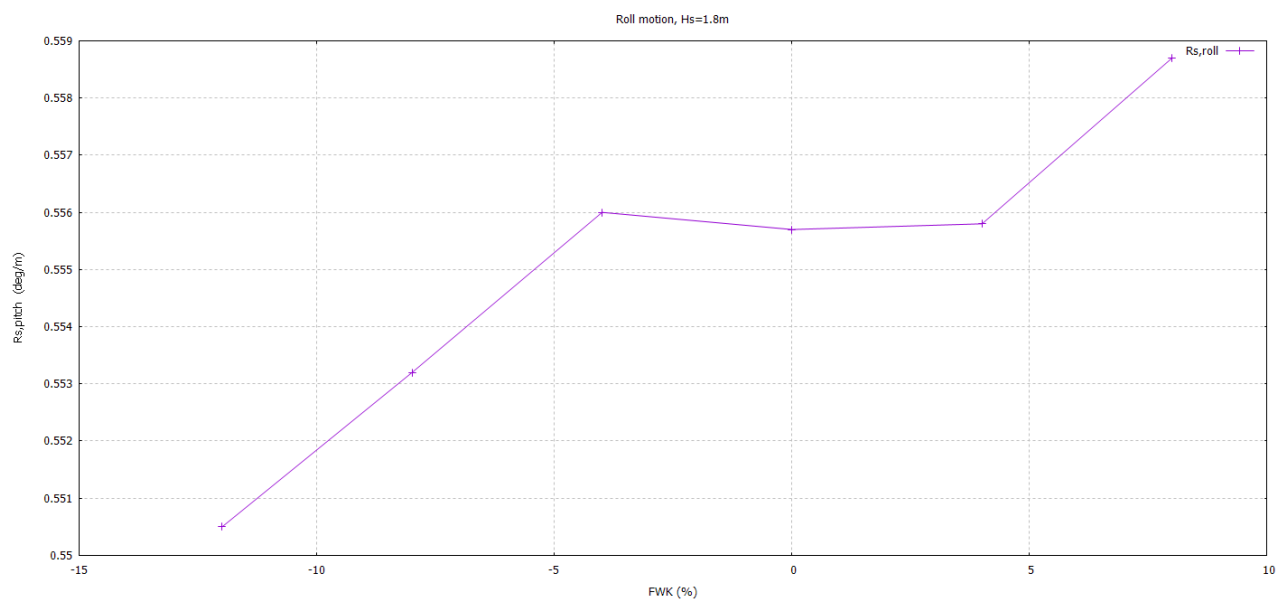
Parametar pozicije pramca *FWK* predstavlja koeficijent koji je definiran kao omjer duljine  $L_{pp}$  i uzdužne pozicije pramčane konture, a variran je u rasponu od -12% do +8% u odnosu na koeficijent pozicije pramca *FWK* inicijalne forme koji iznosi  $FWK = 0.9$ . Za svaku varijaciju forme proveden je proračun odziva ljuľanja i posrtanja, te su prikazani rezultati u obliku dijagrama prijenosnih funkcija RAO, te značajne valne amplitude ljuľanja odnosno posrtanja u ovisnosti o koef. pozicije pramca *FWK* odnosno volumenu. Na Slika 68. i Slika 69. prikazan je utjecaj varijacije koef. *FWK* na RAO prijenosne funkcije za valjanje i posrtanje.



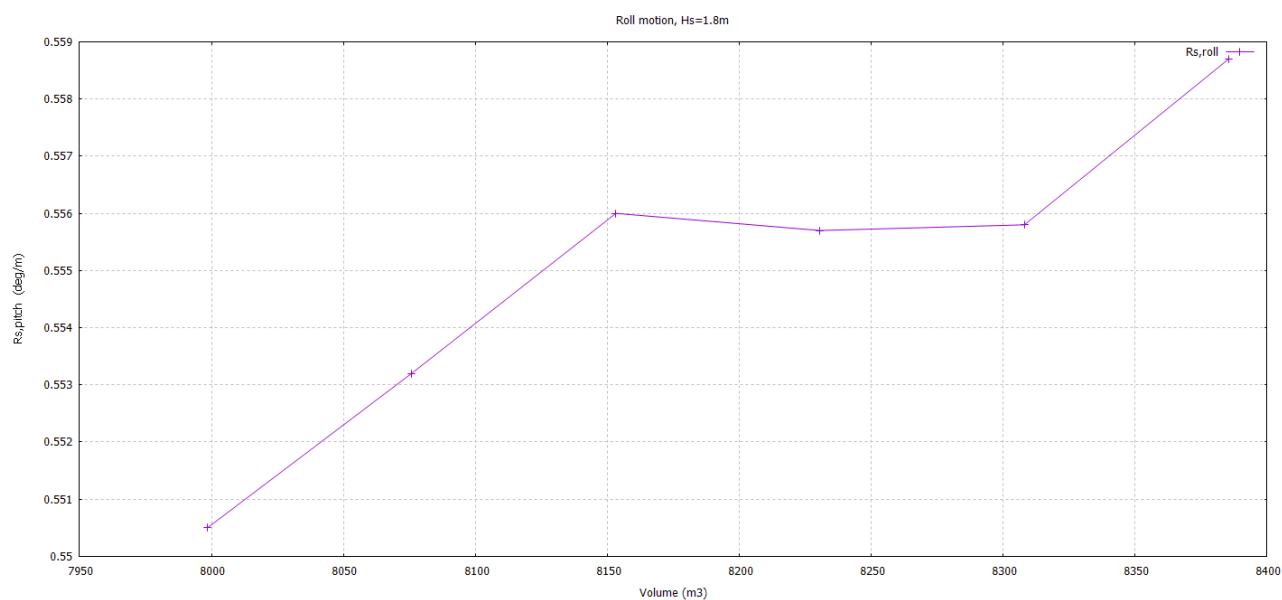
Slika 68. Utjecaj *FWK* na RAO ljuľanja  $\eta_4$



Slika 69. Utjecaj *FWK* na RAO posrtanja  $\eta_5$

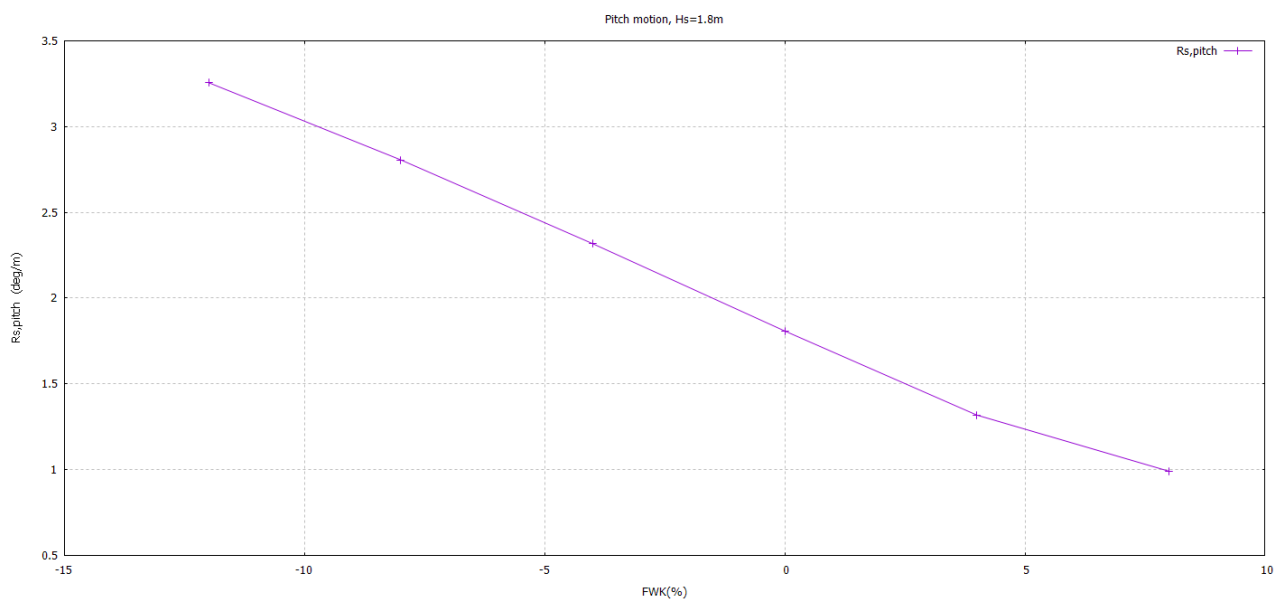


Slika 70. Utjecaj pozicije pramca  $FWK$  na ljuľanje  $R_{S,\eta 4}$

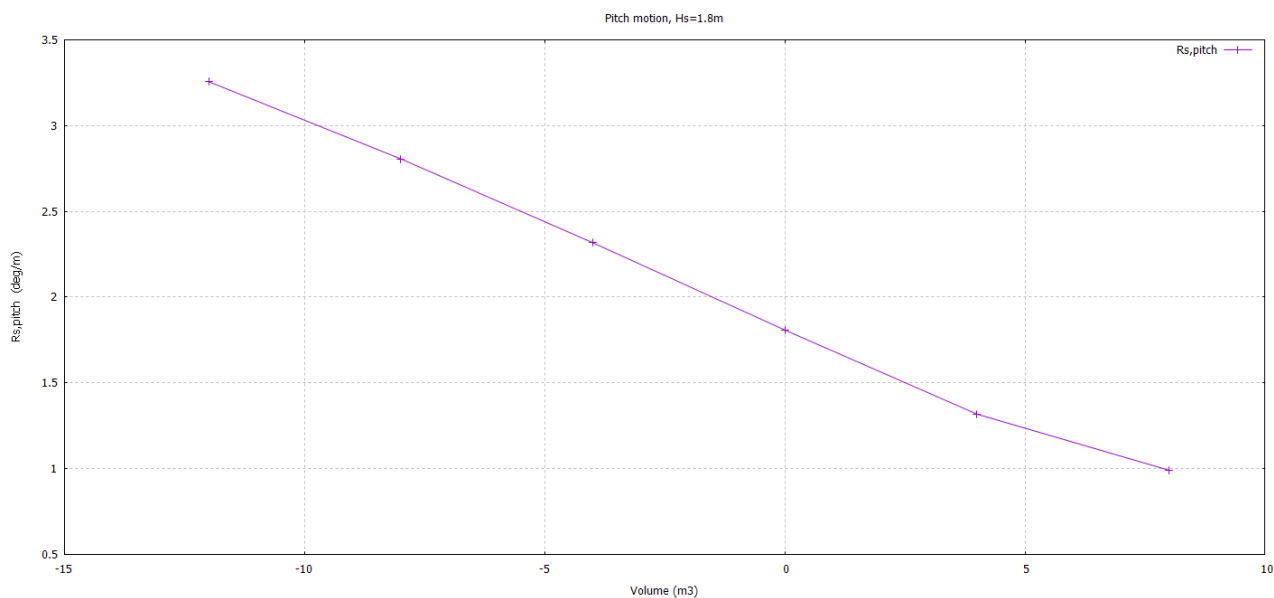


Slika 71. Utjecaj pozicije pramca  $FWK$  na ljuľanje  $R_{S,\eta 4}$  u odnosu na volumen istisnine  $V$  ( $m^3$ )

Kako se vidi iz dijagrama, Slika 70. i Slika 71., značajna valna amplituda ljuľanja  $R_{S,\eta 4}$  skokovito raste uzdužnom pozicijom pramca.



Slika 72. Utjecaj pozicije pramca  $FWK$  na posrtanje  $R_{S,\eta5}$

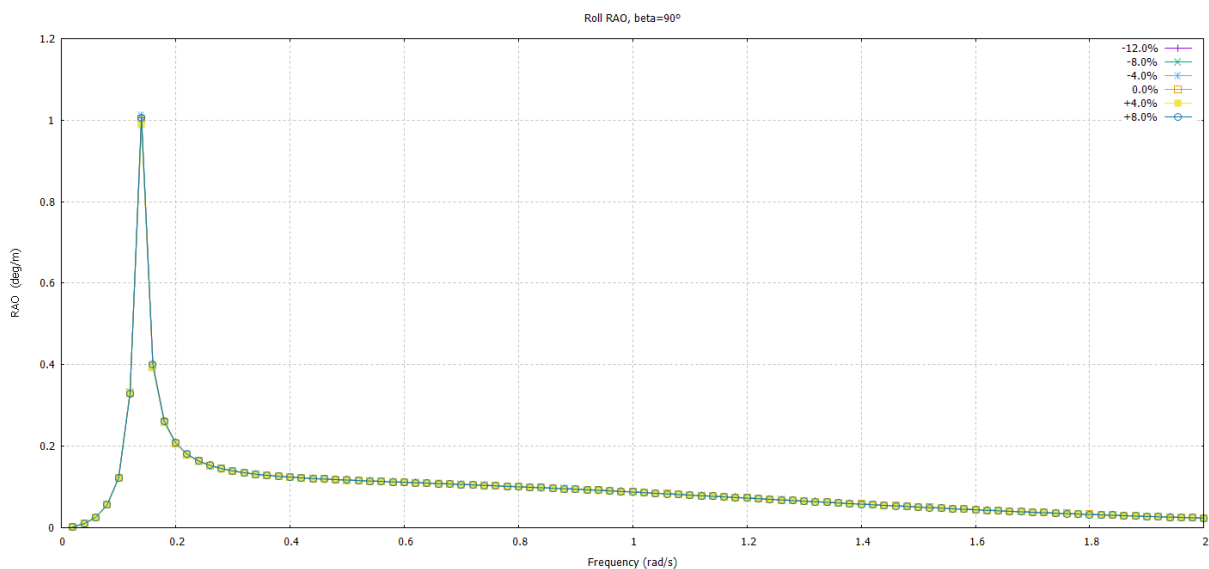


Slika 73. Utjecaj pozicije pramca  $FWK$  na posrtanje  $R_{S,\eta5}$  u odnosu na volumen istisnine  $V$  ( $m^3$ )

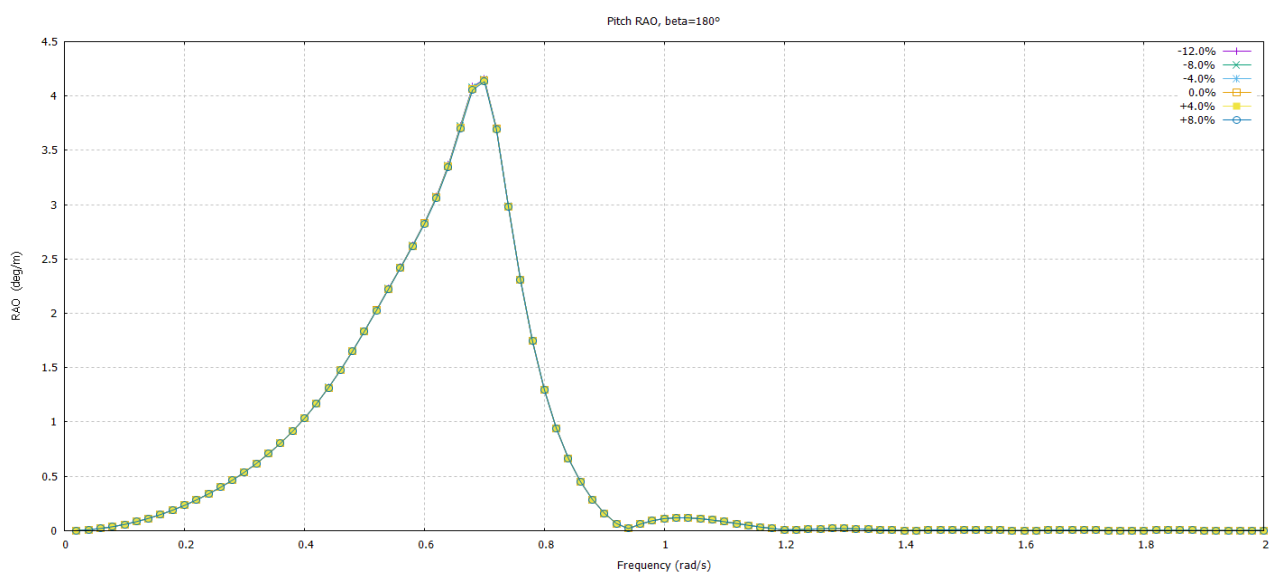
Kako se vidi iz dijagrama, Slika 72. i Slika 73., značajna valna amplituda posrtanja  $R_{S,\eta5}$  opada proporcionalno s uzdužnom pozicijom pramca.

#### 4.12. Analiza utjecaja varijacije pozicije krme ACU

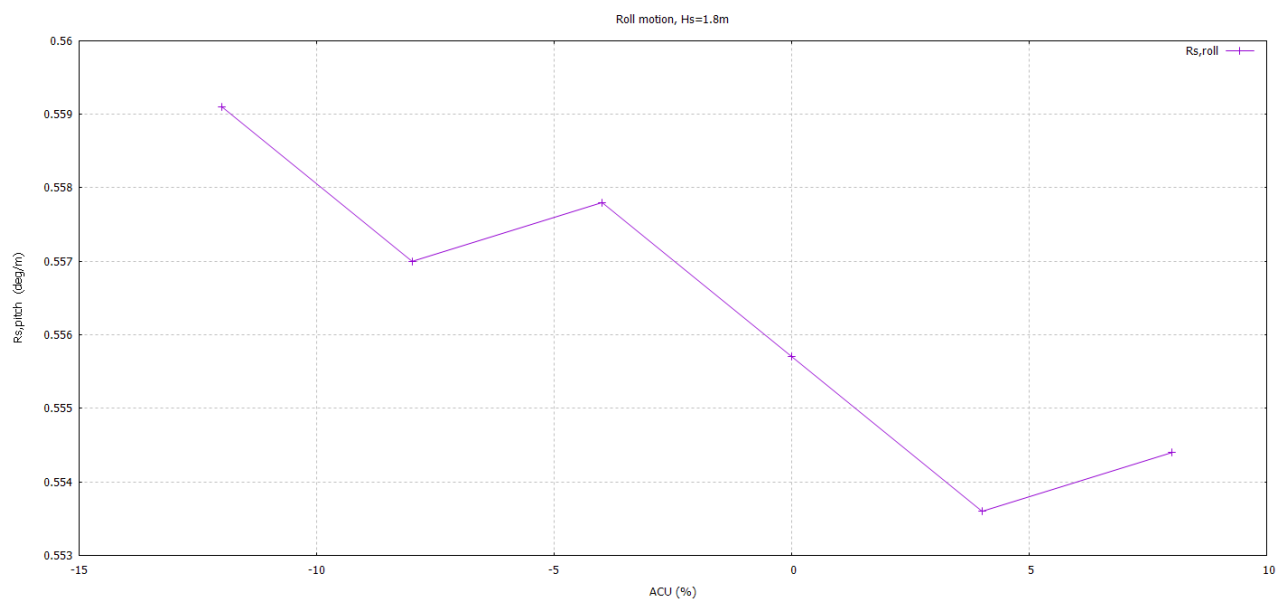
Parametar pozicije krme ACU predstavlja koeficijent koji je definiran kao omjer duljine  $L_{pp}$  i uzdužne pozicije početka kobilice, a variran je u rasponu od -12% do +8% u odnosu na koeficijent pozicije krme ACU inicijalne forme koji iznosi  $ACU=0.2$ . Za svaku varijaciju forme proveden je proračun odziva ljuľanja i posrtanja, te su prikazani rezultati u obliku dijagrama prijenosnih funkcija RAO, te značajne valne amplitude ljuľanja odnosno posrtanja u ovisnosti o koef. pozicije krme ACU odnosno volumenu. Na Slika 74. i Slika 75. prikazan je utjecaj varijacije koef.  $FWK$  na RAO prijenosne funkcije za valjanje i posrtanje.



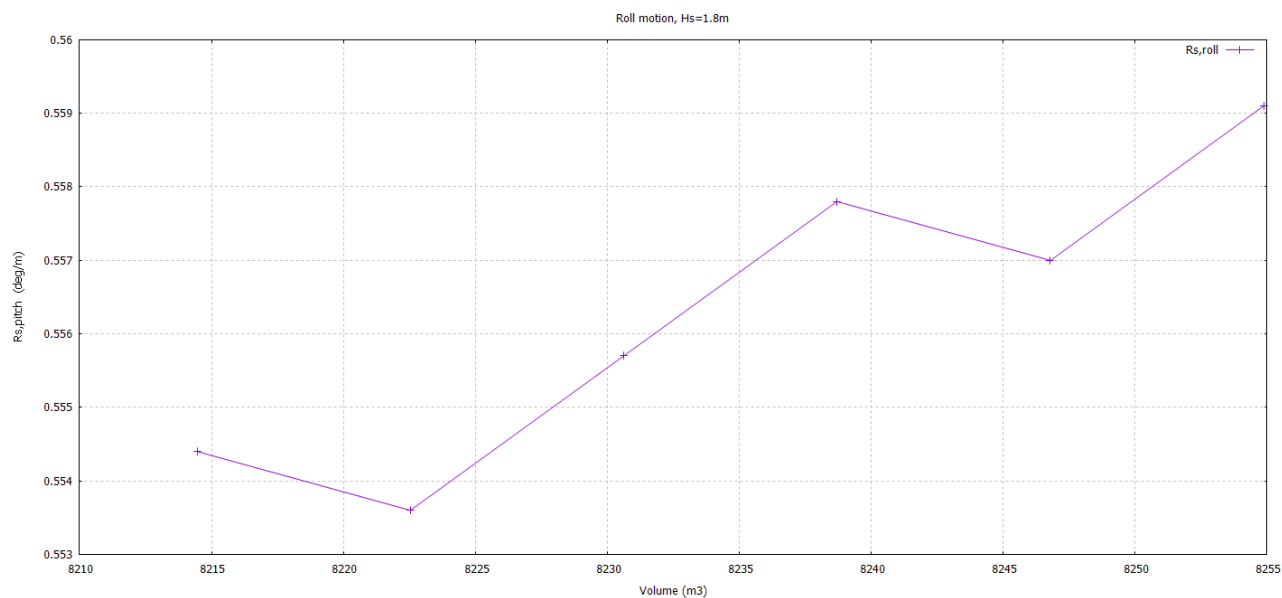
Slika 74. Utjecaj ACU na RAO ljuľanja  $\eta_4$



Slika 75. Utjecaj ACU na RAO posrtanja  $\eta_5$

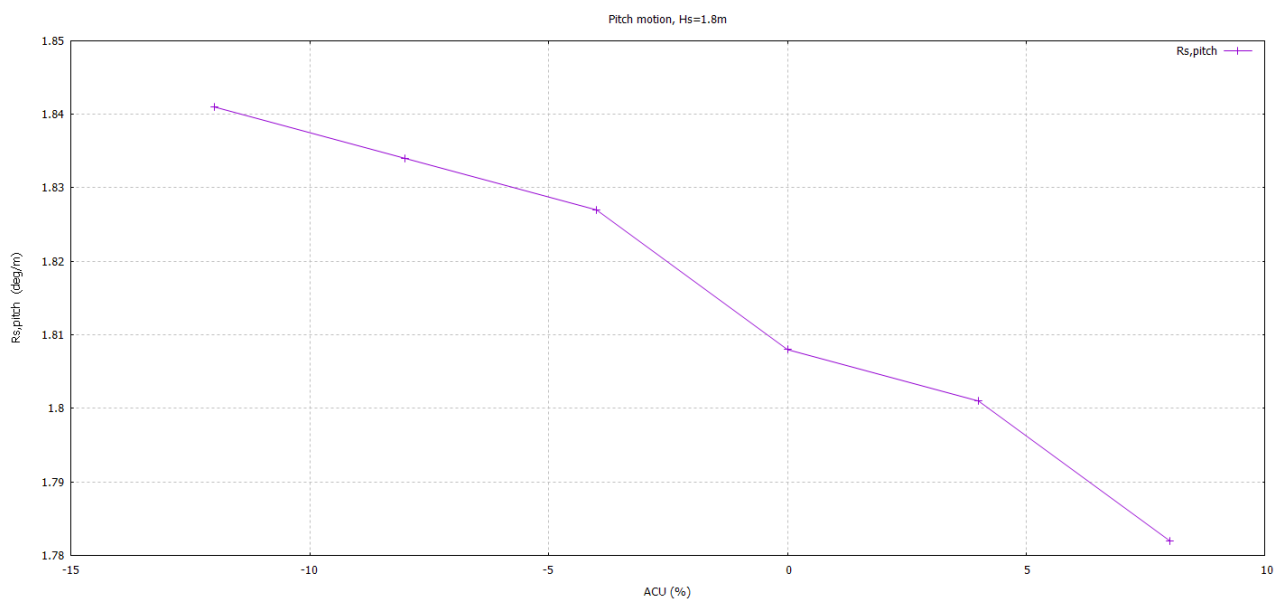


Slika 76. Utjecaj pozicije krme ACU na ljuľanje  $R_{S,\eta_4}$

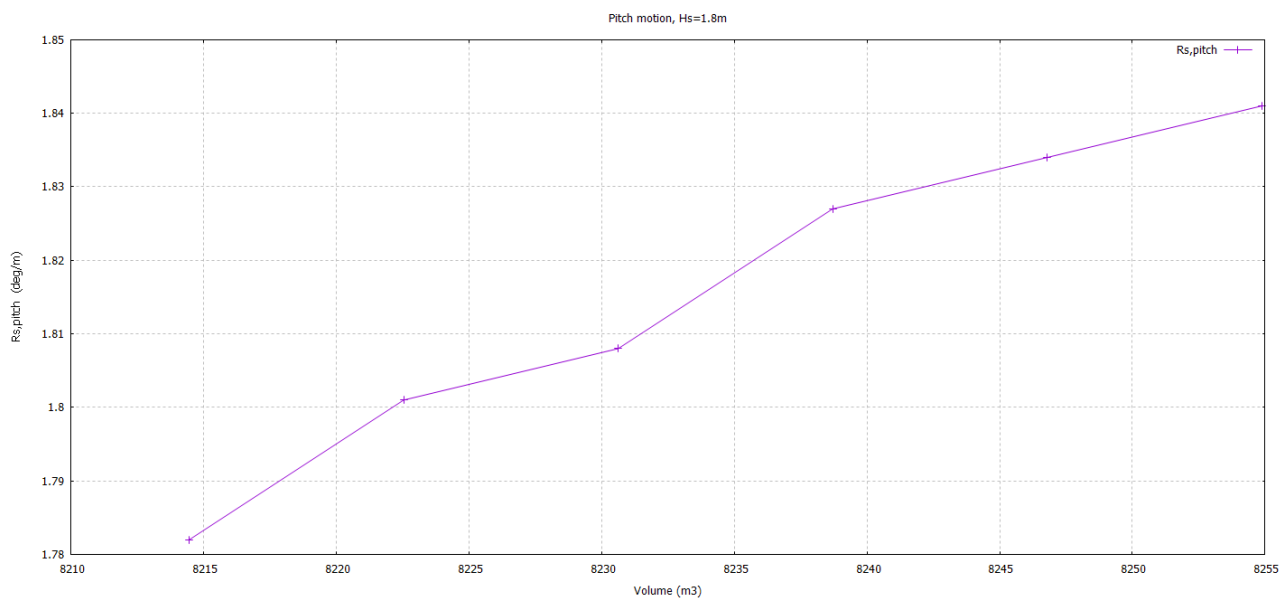


Slika 77. Utjecaj pozicije krme ACU na ljuľanje  $R_{S,\eta_4}$  u odnosu na volumen istisnine  $V$  (m³)

Kako se vidi iz dijagrama, Slika 76. i Slika 77., značajna valna amplituda ljuľanja  $R_{S,\eta_4}$  skokovito opada uzdužnom pozicijom pramca.



Slika 78. Utjecaj pozicije krme ACU na posrtanje  $R_{S,\eta_5}$



Slika 79. Utjecaj pozicije krme ACU na posrtanje  $R_{S,\eta_5}$  u odnosu na volumen istisnine  $V$  ( $\text{m}^3$ )

Kako se vidi iz dijagrama, Slika 78. i Slika 79., značajna valna amplituda posrtanja  $R_{S,\eta_5}$  opada proporcionalno s uzdužnom pozicijom pramca.

## 5. ZAKLJUČAK

U okviru rada dizajniran je i implementiran novi programski modul *Hydrostar* kojim se proširuju funkcionalnosti programa otvorenog koda *d3v-gsd*. Novi modul omogućuje automatiziranu pripremu ulaznih podataka za program HydroSTAR (Bureau Veritas) za analitički zadanu parametarsku formu te provedbu proračuna pomorstvenosti. Procedura proračuna sastoji se od tri koraka: generiranje mreže, priprema ulaznih podataka i provedbu proračuna pozivanjem HydroSTAR modula.

Zadanu analitičku formu moguće je modificirati varijacijom 11 različitih parametara. Primjenom razvijenog modula provedena je analiza utjecaja parametara na odzive ljuljanja i posrtanja. U okviru ove studije utjecaj svakog pojedinog parametara se analizirao zasebno uz pretpostavku da se promjene različitih parametara mogu razmatrati neovisno, kako su to radili i Babadi i Ghassemi [5]. Za potrebe ove analize izrađena je programska funkcija unutar modula *Hydrostar* nazvana *robustna metoda*, koja automatizirano provodi niz proračuna varirajući parametre 1-7 od -15% do +15% uz korak od 5%, odnosno parametre 8-11 od -12% do +8% uz korak od 4% (zbog ograničenja domene prilikom generiranja forme broda).

Rezultati studije pokazali su da povećanje volumena istisnine utječe na poboljšanje pomorstvenih svojstava ljuljanja u slučajevima varijacije parametara  $L_{pp}$ ,  $B_m$ ,  $MS_{full}$ ,  $TR_{full}$ ,  $TB$ ,  $TD$  osim u slučajevima varijacije parametara  $FWD_{full}$ ,  $FWK$ ,  $ACU$  gdje se odzivi ljuljanja povećavaju s povećanjem volumena istisnine. Nadalje, rezultati za posrtanje, koji su također ispitivani, pokazuju pozitivan utjecaj povećanja volumena istisnine na pomorstvena svojstva u slučajevima varijacije parametara  $L_{pp}$ ,  $MS_{full}$ ,  $TB$ ,  $FWK$ , dok se varijacijom parametara  $FWD_{full}$ ,  $TR_{full}$ ,  $TD$ ,  $ACU$  povećanje volumena povećava odzive posrtanja. Varijacije koef. punoće krme  $AFT_{full}$  ima neznatan utjecaj na pomorstvena svojstva i u jednom i u drugom slučaju.

Zaključno se može reći kako je *Hydrostar* koristan računalni alat za brzu provedbu proračuna pomorstvenosti u programu HydroSTAR (BV) zato što omogućuje prilagođenu i automatiziranu pripremu ulaznih podataka, a svoju najbolju primjenu može pronaći u automatiziranom proračunu niza formi čije pomorstvene karakteristike se žele ispitati. Svakako postoji mogućnost daljnjeg razvoja ovakvog alata u smislu razvoja specifičnih funkcionalnosti koji odgovaraju provedbi određenih studija, analiza ili pojedinih proračuna.

Programski modul *Hydrostar*, kao i program *d3v-gsd* je otvorenog koda i dostupan svima, uz napomenu da je za korištenje programa HydroSTAR (Bureau Veritas) potrebna puna licenca. Program *d3v-gsd* može se preuzeti na GitHub-u putem linka <https://github.com/pprebeg/d3v-gsd.git>.



---

**LITERATURA**

- [1] Gregory J. Grigoropoulos; Dimitris S. Chalkias, »Hull-form optimization in calm and rough water,« *Computer-Aided Design*, pp. 977-984, 2010.
- [2] E. Sairoz, »Inverse design of ship hull forms for seakeeping,« *Ocean Engineering*, pp. 1386-1395, 2009.
- [3] Sadik Ozum; Bekir Sener; Huseyin Yilmaz, »A parametric study on seakeeping assessment of fast ships in conceptual design stage,« *Ocean Engineering*, pp. 1493-1447, 2011.
- [4] Mohsen Khosravi Babadi; Hassan Ghassemi, »Parametric Study on Vessel Body Lines Modeling to Optimize Seakeeping Performance,« *Journal of Ocean Research*, pp. 5-10, 2014.
- [5] Mohsen Khosravi Babadi; Hassan Ghassemi, »Effect of Hull Form Coefficients on the Vessel Seakeeping Performance,« *Journal of Marine Science and Technology*, pp. 594-604, 2013.
- [6] Jasna Prpić-Oršić; Većeslav Čorić, Pomorstvenost plovnih objekata, 1 ur., Rijeka: Zigo, 2006..
- [7] DNV, »Environmental conditions and environmental loads,« Det Norske Veritas, 2010.
- [8] L. J. Erdhart, »Završni rad,« 2020.
- [9] D. Kramel, »DBB Method - A Parametric Ship Design Application,« 2019. [Mrežno]. Available: <http://dbb.ucl.im/>.
- [10] John Calleya; Rachel Pawling; Alistair Greig, »A Data Driven Holistic Early Stage Design Process to Design Profitable Low Emission Cargo Ships,« u *12th International Marine Design Conference 2015*, 2015.
- [11] Bureau Veritas, »HydroSTAR for experts USER MANUAL,« Bureau Veritas, Paris, 1991-2016.
- [12] Andrija Ljulj; Vedran Slapničar, »Seakeeping Performance of a New Coastal Patrol Ship for the Croatian Navy,« *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020.

---

**PRILOG**

CD-disk