

Proračun poniranja i posrtanja na harmonijskim valovima metodom rubnih elemenata

Burazer, Frane

Undergraduate thesis / Završni rad

2014

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:235:579992>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-30**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Frane Burazer

Zagreb, 2014.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

prof. dr. sc. Većeslav Čorić, dipl. ing.

Student:

Frane Burazer

Zagreb, 2014.



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum: 18-09-2014	Prilog
Klasa: 602-04/14-612	
Ur.broj: 15-1703-14-357	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Frane Burazer**

Mat. br.: 0035177868

Naslov rada na hrvatskom jeziku:

PRORAČUN PONIRANJA I POSRTANJA NA HARMONIJSKIM VALOVIMA METODOM RUBNIH ELEMENATA

Naslov rada na engleskom jeziku:

ANALYSIS OF HEAVING AND PITCHING IN HARMONIC WAVES BY BOUNDARY METHOD

Opis zadatka:

Forma uronjenog volumena broda opisana je analitičkim izrazom:

$$a(x) = a_0 \left(1 - \left(\frac{x}{l} \right)^\alpha \right) \left(1 - \beta \left(\frac{x}{l} \right) \right)$$

gdje je

- a_0 - poluširina vodne linije na sredini volumena,
- L - duljina vodne linije,
- a, b - zadani parametri forme.

Uronjeni volumen je rotaciono tijelo polukružnog presjeka. Vrijednosti parametara forme i mase odrediti prema predlošku iz kolegija Osnove teorije pomorstvenosti.

Potrebno je izvršiti proračun poniranja i posrtanja broda na morskim valovima za stanje mora određeno u jednogodišnjem povratnom periodu u programu iz kolegija Osnove teorije pomorstvenosti. Proračun izvesti na temelju koeficijenata hidrodinamičke reakcije (pridružena masa, prigušenje) i uzbude za polukružne presjeke.

Dobivene rezultate usporediti s vrijednostima izračunatim pomoću softverske podrške za proračun poniranja i posrtanja metodom rubnih elemenata (3 dim model) iz lit. [1].

Literatura:

- [1] - : WAVESHIP, SESAM Users Manual; DnV
- [2] - Wolfram, S.: Mathematica
- [3] - : Excel
- [4] - Čustić, L.: Program iz predmeta Osnove teorije pomorstvenosti; FSB 2012.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

11. studenog 2013.

1. rok: 21. veljače 2014.

1. rok: 3., 4. i 5. ožujka 2014.

2. rok: 12. rujna 2014.

2. rok: 22., 23. i 24. rujna 2014.

Zadatak zadao:

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Nastia Degiuli

Prof. dr. sc. Većeslav Čorić

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

Zahvaljujem se mentoru profesoru dr.sc. Većeslavu Čoriću, dipl. ing. te docentu dr.sc. Ivanu Čatipoviću, dipl. ing. na ukazanoj pomoći i znanju pri izradi ovog rada.

Frane Burazer

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	IV
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
1.UVOD	1
2. POMORSTVENOST BRODA	2
2.1 Gibanje broda na valovima	2
2.2 3 – D metoda rubnih elemenata.....	5
2.2.1 <i>Potencijalno strujanje</i>	6
2.2.2 <i>Harmonijski valovi</i>	9
2.2.3 <i>Difrakcija ili lom vala</i>	10
2.2.4 <i>Izrazi za proračun sila</i>	11
2.3 Hidrodinamičke reakcije	13
2.3.1 <i>Valovi radijacije</i>	14
2.4 Spektralna analiza	15
2.4.1 <i>Spektar valova</i>	16
2.4.2 <i>Prijenosne funkcije</i>	17
2.4.3 <i>Spektar odziva</i>	17
2.5 Programski paket Sesam	18
2.5.1 <i>Wadam</i>	18
3.PRORAČUN ODZIVA ZADANE FORME.....	19
3.1 Opis zadane forme.....	19
3.2 Generiranje ulaznih podataka.....	21
3.3 Spektar valova	23
3.4 Prikaz izlaznih rezultata	25
3.4.1 <i>Prijenosna fukcija poniranja</i>	25
3.4.2 <i>Prijenosna funkcija posrtanja</i>	26
3.4.3 <i>Spektar odziva poniranja</i>	27
3.4.4 <i>Spektar odziva posrtanja</i>	29
3.5 Značajne veličine.....	30
4. USPOREDBA REZULTATA.....	31
5. ZAKLJUČAK	33

6. LITERATURA.....	34
PRILOG A.....	35
PRILOG B.....	36

POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz translacijskih i rotacijskih pomaka broda.....	3
Slika 2. Model u Prefemu.....	23
Slika 3. Spektar valova.....	25
Slika 4. Prijenosna funkcija za poniranje.....	26
Slika 5. Prijenosna funkcija za posrtanje.....	27
Slika 6. Spektar odziva za poniranje.....	29
Slika 7. Spektar odziva za posrtanje.....	30

POPIS TABLICA

Tablica 1. Karakteristike forme.....	21
Tablica 2. Parametri forme.....	21
Tablica 3. Značajne veličine iz spektra valova.....	31
Tablica 4. Usporedba značajnih veličina za spektar odziva poniranja i posrtanja.....	31
Tablica 5. Usporedba spektra odziva poniranja dobivenih Wadamom i Waveshipom.....	32
Tablica 6. Usporedba spektra odziva posrtanja dobivenih Wadamom i Waveshipom.....	33

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
M	kg	masa broda
ρ	kg/m^3	gustoća morske vode
p	Pa	tlak
g	m/s^2	ubrzanje zemljine sile teže
A_{jk}		dodatna masa u smjeru j uslijed njihanja u smjeru k
B_{jk}		koeficijent prigušenja u smjeru j uslijed njihanja u smjeru k
C_{jk}		hidrostatički povratni koeficijent u smjeru j uslijed njihanja u smjeru k
$H_{1/3}$	m	značajna visina vala
x, y, z		translacijski koordinatni sustav
x_0, y_0, z_0		nepomični koordinatni sustav
x_b, y_b, z_b		koordinatni sustav broda
F_i	N	amplituda uzbudne sile ($i=1,2,3$)
F_n	N	Froudiv broj
H_{Ra}		prijenosna funkcija
R_a		amplituda odziva
T_z	s	nulti period vala
T_m	s	modalni period vala
U	m/s	brzina broda
L	m	duljina broda
ω	rad/s	frekvencija vala
ω_e	rad/s	susretna frekvencija
Φ_0	m^2/s	potencijal nailaznog vala
Φ_7	m^2/s	difrakcijski potencijal
ζ	m	podizaj (elevacija) vala
ζ_a	m	amplituda vala
λ	m	valna duljina
RAO		operator amplitude odziva
S_ζ	m^2/s	spektar valova
S_R		spektar odziva
i, j, k		jedinični vektori u smjeru osi x, y, z
k	m^{-1}	valni broj
m_n	m^2s^{-n}	n-ti moment spektra
t	s	vrijeme

Φ	m^2/s	potencijal brzine strujanja
u, v_x	m/s	komponenta brzine čestice fluida u smjeru osi x
w, v_z	m/s	komponenta brzine čestice fluida u smjeru osi z
L	m	duljina broda
a_{ij}		dvodimenzijaska dodatna masa u smjeru i, uslijed njihanja u smjeru j
b_{ij}		dvodimenzijaski koeficijent prigušenja u smjeru i, uslijed njihanja u smjeru j
η_{ai}	m	amplituda i-tog oblika njihanja ($i=1,2,3$)
η_{ai}	rad	amplituda i-tog oblika njihanja ($i=4,5,6$)

1. UVOD

Pomorstvenost broda je zbirno ime za sva gibanja, ubrzanja, zaljevanja, udaranja i zaljetanja koji nastaju kao posljedica plovidbe na valovitom moru. Bez obzira radi li si o plovnim ili pak o fiksnim objektima djelovanje valova prouzročiti će njihove pomake i unutarnja naprezanja. Zato je potrebno što bolje razmotriti sve utjecaje njihanja broda kako bi omogućili što sigurniji i operativniji radni vjek broda i ostalih pomorskih objekata na moru.

Da bi odredili odziv broda za određeno stanje mora potrebno je prvo razumjeti dinamiku njihanja broda a samim tim nastanak i djelovanje valova. Određivanje značajkih tih slučajnih procesa pomoću spektralne analize omogućuje nam dobivanje rezultata pomoću kojih odabiremo pomorstveno zadovoljavajuću brodsku formu u već ranijoj fazi projektiranja broda. U konačnici nam to znatno olakšava konstruiranje plovnih objekata s obzirom na zahtjeve udobnosti plovidbe te sigurnosti posade, broda i tereta.

U opisu zadatka je bilo potrebno izvršiti proračun poniranja i posrtanja broda na morskim valovima za određeno stanje mora u jednogodišnjem povratnom periodu u programu iz kolegija Osnove teorije pomorstvenosti. Proračun je bilo potrebno izvesti na temelju koeficijenata hidrodinamičke reakcije (pridružena masa, prigušenje) i uzbude za polukružne presjeke. Korištena je metoda rubih elemenata (3 dim. model) koja diskretizira todimenzijski model broda na veliki broj konačnih elemenata. Omogućuje proračun sila, momenata i raspodjele hidrodinamičkog tlaka po oplakanoj površini broskog trupa.

Izrada proračuna se radila pomoću programa Wadam koji je dio programskog paketa Sesam, (Det Norske Veritas).

2. POMORSTVENOST BRODA

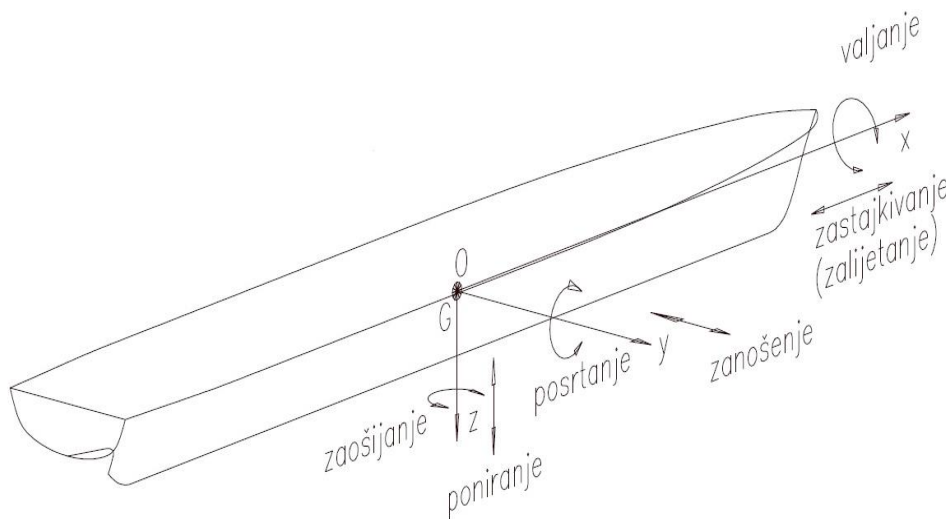
2.1 Gibanje broda na valovima

Pretpostavka razmatranja njihanja broda na valovima je da se brod ponaša kao kruto tijelo što znači da elastični pomaci trupa nemaju veliki utjecaj na njihanja broda. Stoga je uzrok dinamike tijela i fluida kombinirani utjecaj vanjskih sila i momenata, [2].

Rezultirajuće njihanje broda sastoji se od sljedećih šest gibanja podjeljenih u dvije grupe:

1. Translacijska gibanja: -zalijetanje (u smjeru osi x)
-zanošenje (u smjeru osi y)
-poniranje (u smjeru osi z)
2. Rotacijska gibanja: -valjanje (oko osi x)
-posrtanje (oko osi y)
-zaošijanje (oko osi z)

Na slici 1. prikazano je 6 stupnjeva slobode gibanja broda .



Slika 1. Prikaz translacijskih i rotacijskih pomaka broda [3]

Kako bi se definiralo djelovanje vala na brod te njihanje kao posljedica tog djelovanja, potrebno je definirati koordinatne sustave.

Nepomični koordinatni sustav (fiksni, inercijski) $S(x_0, y_0, z_0)$ vezan je za Zemlju. Ravnina X_0Y_0 leži na mirnoj slobodnoj površini, pozitivan smjer osi x_0 je u smjeru napredovanja vala, a može biti i zakrenut u smjeru napredovanja broda. Os z_0 usmjerena je vertikalno prema gore.

Koordinatni sustav broda $G(x_b, y_b, z_b)$ vezan je za brod, a ishodište mu je u težištu broda G . Os x_b leži u smjeru uzdužne simetrale broda, a usmjerena je prema pramcu broda. Os y_b usmjerena je prema lijevom boku broda, a os z_b usmjerena je vertikalno prema gore. U stanju mirovanja broda ravnina X_bY_b paralelna je s mirnom slobodnom površinom.

Translatirajući koordinatni sustav $O(x, y, z)$ kreće se brzinom broda U . Ako brod miruje smjerovi osi jednaki su onima koordinatnog sustava $G(x_b, y_b, z_b)$.

2.1.2 Jednadžba dinamičke ravnoteže

Problem njihanja broda u linearnoj teoriji može se prikazati preko dva neovisna problema:

- problem prisilnog njihanja tijela na mirnoj površini (za određivanje hidrodinamičkih reakcija)
- problem djelovanja vala na nepomično tijelo (za određivanje vanjske sile)

Tijelo koje se njiše na valu u svakom je trenutku u stanju dinamičke ravnoteže. Hidrodinamičke i hidrostatičke sile i momenti uravnoteženi su inercijskim silama i momentima mase tijela, [1].

Dinamička ravnoteža njihanja izražena je sustavom diferencijalnih jednadžbi koji izražava ravnotežu inercijskih, hidrodinamičkih i uzbudnih sila:

$$([M_{jk}] + [A_{jk}])\{\dot{\eta}_j\} + [B_{jk}]\{\dot{\eta}_j\} + [C_{jk}]\{\eta_j\} = \zeta_a\{F_k(t)\} = Re\{\zeta_a\{F_k\}e^{i\omega t}\} \quad (2.1)$$

Uz pretpostavku harmonijskog gibanja dinamička ravnoteža njihanja izražena je sljedećim sustavom algebarskih jednadžbi:

$$([C_{jk}] - \omega^2([M_{jk}] + [A_{jk}]) + i\omega[B_{jk}])\{\delta_j\}e^{i\omega t} = \zeta_a\{F_k\}e^{i\omega t} \quad (2.2)$$

Prethodna jednakost mora biti zadovoljena u svakom trenutku pa se uvjet dinamičke ravnoteže svodi na sustav kompleksnih algebarskih jednadžbi s nepoznicama $\delta_j, j=1\dots 6$

$$([C_{jk}] - \omega^2([M_{jk}] + [A_{jk}]) + i\omega[B_{jk}])\{\delta_j\} = \zeta_a\{F_k\} \quad (2.3)$$

gdje je:

$[M_{jk}]$ - matrica mase tijela,

$[A_{jk}]$ -matrica pridruženih masa,

$[B_{jk}]$ -matrica hidrodinamičkog prigušenja i

$[C_{jk}]$ -matrica krutosti povratnih hidrostatskih sila.

2.2 3-D metoda rubnih elemenata

3-D metoda rubnih elemenata je numerička metoda za izračun strujanja oko tijela. Temelji se na principu Greenova integralnog teorema. Ova metoda je ograničena na proizvoljno oblikovana tijela sa nultom srednjom brzinom napredovanja. To je prihvatljivo pojednostavljeno za većinu fiksnih ili plutajućih struktura u upotrebi danas u offshore industriji, [2].

Prema Greenovu teoremu moguće je transformirati trodimenzionalnu linearnu homogenu diferencijalnu jednadžbu u dvodimenzionalnu integralnu jednadžbu. Na taj način trodimenzionalna Laplaceova (potencijalna) jednadžba može se transformirati u površinsku integralnu jednadžbu. Površina tijela je podjeljena na N panela dovoljno malenih da se može pretpostaviti da su izvori(ponori), snaga potencijalnog strujanja uzrokovana izvorom konstantni po cijeloj površini svakog elementa.

Prednost ove metode je ta da je problem reduciran na dvodimenzionalni (površinski) problem.

Panel metoda je tehnika koja se koristi najčešće za analizu linearnog odziva stabilnog stanja velikih volumenskih struktura na valovitom moru.

2.2.1 Potencijalno strujanje

Teorija potencijalnog strujanja se koristi kako bi se odredila svojstva valova te procjenila njihanja i opterećenja plovnih objekata. Za potencijalno strujanje se pretpostavlja da je neviskozno, nestlačivo i homogeno. Potencijal brzine je funkcija koja sadržava varijable vremena i prostora i koja vrijedi u cijeloj domeni fluida.

Osnovni uvjet potencijalnog strujanja izražen je jednačbom:

$$\operatorname{rot} \mathbf{v} = 0 \quad (2.4)$$

$$\mathbf{v}(x, y, z; t) = \operatorname{grad} \Phi(x, y, z; t) \quad (2.5)$$

Potencijal brzine strujanja $\Phi(x, y, z; t)$ je izraz koji ima svojstvo da je komponenta brzine u točki fluida u bilo kojem trenutku zapravo njegova derivacija u tom smjeru za odabranu točku, [1].

Izraz za potencijal brzine strujanja u valu je harmonijska funkcija. Potencijal brzine strujanja harmonijskog vala mora zadovoljavati četiri rubna uvjeta:

1. Uvjet kontinuiteta ili Laplaceovu jednačbu u području fluida
2. Rubni uvjet nepromočivosti na dnu
3. Dinamički rubni uvjet na slobodnoj površini
4. Kinematički rubni uvjet na slobodnoj površini

1. Uvjet kontinuiteta – divergencija brzine strujanja jednaka je nuli (fluid pretpostavljen homogenim i nestlačivim) – Laplacova jednačba.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.6)$$

2. Uvjet nepromočivosti na dnu fluida - vertikalna komponenta brzine strujanja čestice fluida na dnu jednaka je nuli.

$$w = v_z = \frac{\partial \Phi_w}{\partial z} = 0 \quad (2.7)$$

Za $z = -d$

3. Dinamički rubni uvjet - određuje da je tlak na slobodnoj površini jednak atmosferskom. Tlak unutar nestacionarnog bezvrtložnog strujanja određuje se Bernoullijevom jednačbom u općem obliku:

$$\frac{\partial \Phi_w}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \Phi_w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_w}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{p}{\rho} + gz = C^* \quad (2.8)$$

4. Kinematički rubni uvjet - vertikalna brzine čestice fluida na slobodnoj površini jednaka vertikalnoj brzini slobodne površine, a proizlazi iz:

$$\frac{Dz}{Dt} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (2.9)$$

Parcijalnim deriviranjem kombinacije dinamičkog i kinematičkog rubnog uvjeta dobije se kinematičko-dinamički rubni uvjet ili Cauchy-Poissonov uvjet.

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{g} \frac{\partial^2 \phi_w}{\partial t^2} = 0 \quad (2.10)$$

2.2.2 Harmonijski valovi

Harmonijski valovi su oni valovi kod kojih se valna obilježja ponavljaju periodično u vremenu i prostoru. Veliki doprinos području pomorstvenosti dali su St. Denis i Pierson jer su uveli princip superpozicije. Njihova hipoteza je da odziv broda na morskim valovima može biti prikazan kao suma odziva na harmonijskim valovima različitih frekvencija. Problem njihanja broda na valovima može se u lineranoj teoriji prikazati preko dva neovisna problema:

- prognozu njihanja i opterećenja broda na harmonijskim valovima
- statističku prognozu odziva na morskim valovima.

Svojstva pravilnog vala su:

1. Središte koordinatnog sustava nalazi se na razini mirne vode i vertikalna os z usmjerena je prema gore
2. Razina mirne površinske vode je srednja razina odnosno razina vode kada nema valova
3. Dubina vode h je udaljenost mjerena od razine morskog dna do razine mirne vode. Dubina vode h je uvijek pozitivna vrijednost pa je na morskome dnu $z=-h$
4. Valni brijeg je najviša točka vala, dok je valni dol najniža točka vala
5. Pravilni valovi najčešće se opisuju trigonometrijskim funkcijama-sinusni ili kosinusni val. Tada je valna amplituda ζ_a udaljenost od razine mirne vode do valnog brijega (ili dola).
6. Valna visina H je udaljenost između najveće i najniže točke vala odnosno između valnog dola i brijega.
7. Valna duljina λ je horizontalna udaljenost između dvaju susjednih valnih brijegova, mjerena u smjeru napredovanja vala.
8. Valni period T je vremenski interval između dvaju susjednih brijegova
9. Strmost vala $\frac{H}{\lambda}$ je omjer visine bala i njegove duljine.

2.2.3 Difrakcija ili lom vala

Naišavši na tijelo koje miruje nailazni val predat će dio svoje energije tijelu. Dio energije će zajedno s valom nastaviti napredovanje iza tijela. Val će doživjeti promjenu koja se očituje na smanjenju njegove visine, dok su ostale komponente ostale iste. Ta promjena naziva se difrakcija ili lom. [1] Slika strujanja oko uronjena dijela volumena tijela, može se odrediti u dva koraka. U prvom koraku opisuje se model strujanja oko nepomičnog tijela koje nastaje uslijed nailazećeg vala $\zeta_0(x, z, y; t)$ i njegove difrakcije.

Takvo se strujanje može opisati dvjema funkcijama: funkcijom potencijala brzine strujanja nailazećeg vala Φ_0 i funkcijom potencijala brzine strujanja njegove difrakcije Φ_7 .

$$\Phi(x, z, y; t) = \Phi_0(x, z, y; t) + \Phi_7(x, z, y; t) \quad (2.11)$$

Strujanje u difrakcijskoj komponenti vala mora uz postojeće uvjete prethodno navedene u teoriji potencijalnog strujanja zadovoljiti i dodatne uvjete difrakcijske komponente. A to su: rubni uvjet na oplakanoj površini S , te uvjet radijacije u beskonačnosti. Prvi uvjet je posljedica nepromočivosti oplakane površine S , a može se izraziti preko normalne komponente rezultirajuće brzine strujanja u točki te površine v_n :

$$v_n = \mathbf{n} \cdot \text{grad}\Phi = 0 \quad (2.12)$$

Potencijal difrakcijske komponente biti će prikazan kao realni dio kompleksne funkcije:

$$\Phi_7 = \text{Re}[\zeta_a \Phi_7 e^{-i\omega t}] \quad (2.13)$$

Uvjet radijacije u beskonačnosti se odnosi na potencijal brzine difrakcijske komponente vala koji dovoljno daleko od tijela mora zadovoljavati uvjet radijacije. U dvodimenzijском modelu vala, difrakcijska komponenta manifestira se kao harmonijski progresivni val konstantne amplitude, koji se širi lijevo i desno od tijela.

2.2.4 Izrazi za proračun sila

Sila F i moment M , kojom tekučina djeluje na tijelo u valu, posljedica je tlakova p na oplakanoj površini S uronjena volumena tijela. Integriranjem tlaka po oplakanoj površini S dobiva se ukupna sila i moment. [1]

$$\mathbf{F} = - \iint \mathbf{n} p dS \quad (2.14)$$

$$\mathbf{M} = - \iint \mathbf{r} \times \mathbf{n} p dS \quad (2.15)$$

Pojedine komponente te sile i momenta mogu se definirati prema valnim komponentama kao: uzbudna sila, hidrodinamička reakcija i povratna sila.

Izrazi za silu i moment zbog međudjelovanja vala i tijela fizikalno su ispravni i korektni uz prihvaćena pojednostavljenja za zadani model.

Valna uzbudna sila određuje se iz jednačbe:

$$F_u = \operatorname{Re} \left\{ i\omega\rho\zeta_a \iint (\Phi_0(x, y, z) + \Phi_7(x, y, z))n_0 dS_0 e^{-i\omega t} \right\} \quad (2.16)$$

Prvi član u podintegralnim funkcijama dio je uzbudne sile poznat pod nazivom Froude-Krilovljeva sila. Taj dio uzbuđe djelovao bi na tijelo u slučaju kada ne bi nastala difrakcijska komponenta vala, što nije fizikalno moguće u realnim uvjetima. Unatoč tome ta komponenta valne uzbuđe odigrala je značajnu ulogu u razvoju teorije pomorstvenosti, [1].

2.3 Hidrodinamičke reakcije

Posljedica prisilnog osciliranja tijela sa 6 stupnjeva slobode njihanja su hidrostatičke i hidrodinamičke sile. Hidrostatičke sile vraćaju tijelo u početno stanje pa se nazivaju povratnim silama (momentima). Hidrodinamičke sile prigušuju nastalo oscilacijsko gibanje. Jedan dio tih sila je u protufazi s brzinom, a drugi dio je u protufazi s ubrzanjem pa se predstavljaju kao efektivno povećanje mase tijela i stišavanje (prigušenje) njihanja, a zbog prirode njihovog djelovanja nazivaju se hidrodinamičkom reakcijom. Tijekom njihanja u mirnoj tekućini tijelo emitira valove radijacije koji iz sustava odnose energiju i na taj način smanjuju amplitude njihanja.

Izraz za hidrodinamičku reakciju glasi:

$$F_H = Re \left\{ i\omega\rho\Sigma\eta_j \iint (\Phi_j(x, y, z)n_0 dS_0 e^{-i\omega t}) \right\} \quad (2.17)$$

Hidrodinamička reakcija može se zapisati:

$$[A_{jk}]\{\ddot{\eta}_j\} + [B_{jk}]\{\dot{\eta}_j\} = Re\{(-\omega^2[A_{jk}] - i\omega[B_{jk}])\{\delta_j\}e^{-i\omega t}\} \quad (2.18)$$

gdje je:

A_{jk} -koeficijent pridružene (dodatne) mase

B_{jk} -koeficijent hidrodinamičkog prigušenja.

Oba koeficijenta, osim o formi tijela ovise i o frekvenciji njihanja.

2.3.1 Valovi radijacije

Valovi radijacije nastaju na mirnoj tekućini usljed prisilnog gibanja broda na slobodnoj površini. Strujanje oko uronjenog dijela volumena tijela opisano je funkcijama brzine strujanja Φ_j u nastalim valovima radijacije ζ_j ($j=1\dots6$).

Kako je brzina strujanja očito proporcionalna amplitudama njihanja pripadne funkcije potencijala mogu se izraziti koristeći kompleksnu notaciju:

$$\phi_j = \text{Re}[\delta_j \Phi_j e^{-i\omega t}] \quad j = 1 \dots 6 \quad (2.19)$$

gdje su:

δ_j -kompleksne amplitude njihanja

Φ_j -kompleksna prostorna funkcija potencijala brzine strujanja.

Kompleksna funkcija određena je realnom (kosinusnom) Φ_{Cj} komponentom i imaginarnom (sinusnom) Φ_{Sj} komponentom.

$$\Phi_j(x, y, z) = \Phi_{Cj}(x, y, z) + i \Phi_{Sj}(x, y, z) \quad (2.20)$$

Valovi radijacije moraju zadovoljiti uvjete radijacije na velikoj udaljenosti od tijela. Uslijed nepromoćivosti oplakane površine potrebno je uvesti dodatni rubni uvjet za brzinu strujanja u valu radijacije. Ne postoji strujanje kroz oplakanu površinu pa normalna komponenta brzine čestice mora biti jednaka normalnoj komponenti brzine dodirne točke P (x_P, y_P, z_P) oplakane površine S.

2.4 Spektralna analiza

Otkrićem St. Denisa i Piersona omogućeno je po prvi puta razmatranje njihanja i efekata njihanja na nepravilnim valovima, te procjenu rizika premašivanja određenih vrijednosti. Brod se može smatrati jednom vrstom elektroničnog filtra i ulazni signal se sastoji od određenog broja frekvencijskih komponenti koje se pojačavaju i mijenjaju kako bi se prema karakteristikama filtra proizveo izlazni signal. Analogijom broda s elektoničnim filtrom omogućava se prolazak valovima umjesto elektroničkim signalima. Brod se može promatrati kao „crna kutija“ koja prima valove kao ulazni signal i proizvodi njihanja broda kao izlazni signal. Budući da postoji veći broj slučajeva-prijenosnih funkcija koje ovise o brzini broda U i kutu susretanja valova μ , brod se može promatrati kao skup elektroničkih filtra.

Prijenosne funkcije se dobiju kao odzivi broda na pravilnim valovima. Pri vrlo velikim valovima, odnosno niskim valnim frekvencijama njihanje poniranja je u potpunosti sinkronizirano s gibanjem vala. Kad brod nailazi na valove male duljine, odnosno valove više frekvencije, amplitude odziva poprimaju zanemarive vrijednosti, te ne nastupaju u istoj fazi s njihanjima broda. Analogijom s uskopojasnim filtrom, proizlazi da brod propušta samo niske frekvencije.

2.4.1 Spektar valova

Spektar energije valova najpovoljniji je način prikazivanja relativne važnosti komponenti pravilnih valova koji po principu superpozicije stvaraju jedan nepravilan val, [3].

Spektar energije definiran je tako da je površina u jednom frekvencijskom intervalu proporcionalna totalnoj energiji za jediničnu površinu svih valnih komponenti sadržanih u tom intervalu.

Spektar energije valova definiran je:

$$S_{\zeta}(\omega_i)d\omega = \frac{1}{2}\zeta_{ai}^2(\omega) \quad (2.27)$$

Varijanca elevacije valne površine σ_{ζ}^2 jednaka je ukupnoj površini ispod krivulje spektra.

$$\sigma_{\zeta}^2 = \int_0^{\infty} S_{\zeta}(\omega) d\omega \quad (2.28)$$

Iz spektra se odabirom slučajnih faznih pomaka superpozicijom može dobiti nepravilan signal u ovisnosti o vremenu. Povratno se iz nepravilnog signala Fourierovom analizom mogu dobiti harmonijske komponente.

2.4.2 Prijenosne funkcije

Odziv plovnog objekta na harmonijskim valovima najpogodnije je prikazati pomoću H_{Ra} . Dobije se iz odnosa amplituda njihanja broda i valova, na primjer za poniranje prijenosna funkcija je $\frac{\eta_{a1}}{\zeta_a}$, a fazni pomak ε_I . Prijenosne funkcije gornjeg oblika poprimaju bezdimenzijske vrijednosti samo za translacijska gibanja, a kod rotacijskih se bezdimenzionalnost postiže dijeljenjem amplitude njihanja s amplitudom nagiba vala $k\zeta_a$, na primjer za posrtanje prijenosna funkcija je $\frac{\eta_{a5}}{k\zeta_a}$. [1]

Operator amplitude odziva (RAO) definiran je kao kvadrat omjera amplitude odziva R_a i amplitude vala ζ_a :

$$RAO = \left| \frac{R_a}{\zeta_a} \right|^2 \quad (2.29)$$

2.4.3 Spektar odziva

Osnova za određivanje odziva je prijenosna funkcija toga odziva. [1]

Izraz za funkciju spektra odziva:

$$S_R(\omega_e) = RAO \cdot S_\zeta(\omega_e) \quad (2.30)$$

Spektar odziva S_R dobije se množenjem operatora amplitude odziva RAO (kvadrata prijenosne funkcije) i spektra valova S_ζ .

Prijenosna funkcija ovisna je o susretnoj frekvenciji, a određuje se za zadanu brzinu i kurs broda. Njena vrijednost za zadanu susretnu frekvenciju predstavlja amplitudu odziva broda koji se kreće na valovima jedinične amplitude i zadane duljine odnosno frekvencije. [1]

Površina ispod spektra odziva (njihanja) dobije se kao nulti moment spektra:

$$m_{0R} = \int_0^{\infty} S_R(\omega_e) d\omega_e \quad (2.31)$$

2.5 Programski paket Sesam

Sesam, programski paket razvijen od Det Norske Veritasa (DNV), je potpuni sustav za procjenu čvrstoće pri projektiranju brodova ili plovni objekata, a bazira se na metodi konačnih elemenata.

2.5.1 Wadam

Wadam je program za analizu proračuna međusobnog djelovanja između valova i struktura objekata proizvoljnog oblika bilo plutajućih ili fiksnih. [4]

Analiza programa obuhvaća:

- Proračun hidrostatskih podataka i inercijskih značajki
- Izračun globalnog odziva
- Izračun pojedinih globalnih odziva složenog tijela
- Automatski prijenos opterećenja na model konačnih elemenata za daljnju strukturnu analizu

3. PRORAČUN ODZIVA ZADANE FORME

3.1 Opis zadane forme broda

Odziv je bilo potrebno proračunati za formu koja je bila zadana u programskom zadatku iz kolegija Osnove teorije pomorstvenosti. Forma uronjenog volumena je rotaciono tijelo polukružnog presjeka.

Uronjeni volumen broda opisana je analitičkim izrazom:

$$a(x) = a_0 \left(1 - \left(\frac{x}{l}\right)^\alpha\right) \left(1 - \beta \left(\frac{x}{l}\right)\right) \quad (3.1)$$

gdje je:

a_0 -poluširina vodne linije na sredini volumena

α, β -zadani parametri forme

l -duljina vodne linije

U tablici 1. prikazane su glavne dimenzije i hidrostatički podaci za brod.

Tablica 1. Karakteristike forme

Glavne dimenzije			Hidrostatički podaci		
			Vol	34660,4	m^3
I	62	<i>m</i>	A_{VL}	3,178,4	m^2
L	124	<i>m</i>	m_{0x}	-220971	m^4
B	32	<i>m</i>	m_{0z}	-213153	m^4
T	16	<i>m</i>			
Lk	55,62	<i>m</i>	x_B	-6,375	<i>m</i>
Lp	68,38	<i>m</i>	z_B	-6,150	<i>m</i>
N	49				
dX	2,5306	<i>m</i>	g =	9,81	$m s^{-2}$
			r =	1,000	$t m^{-3}$

U tablici 2. prikazani su parametri forme.

Tablica 2. Parametri forme

Parametri forme		
a₀	16	<i>m</i>
a	0,45	
b	0,25	

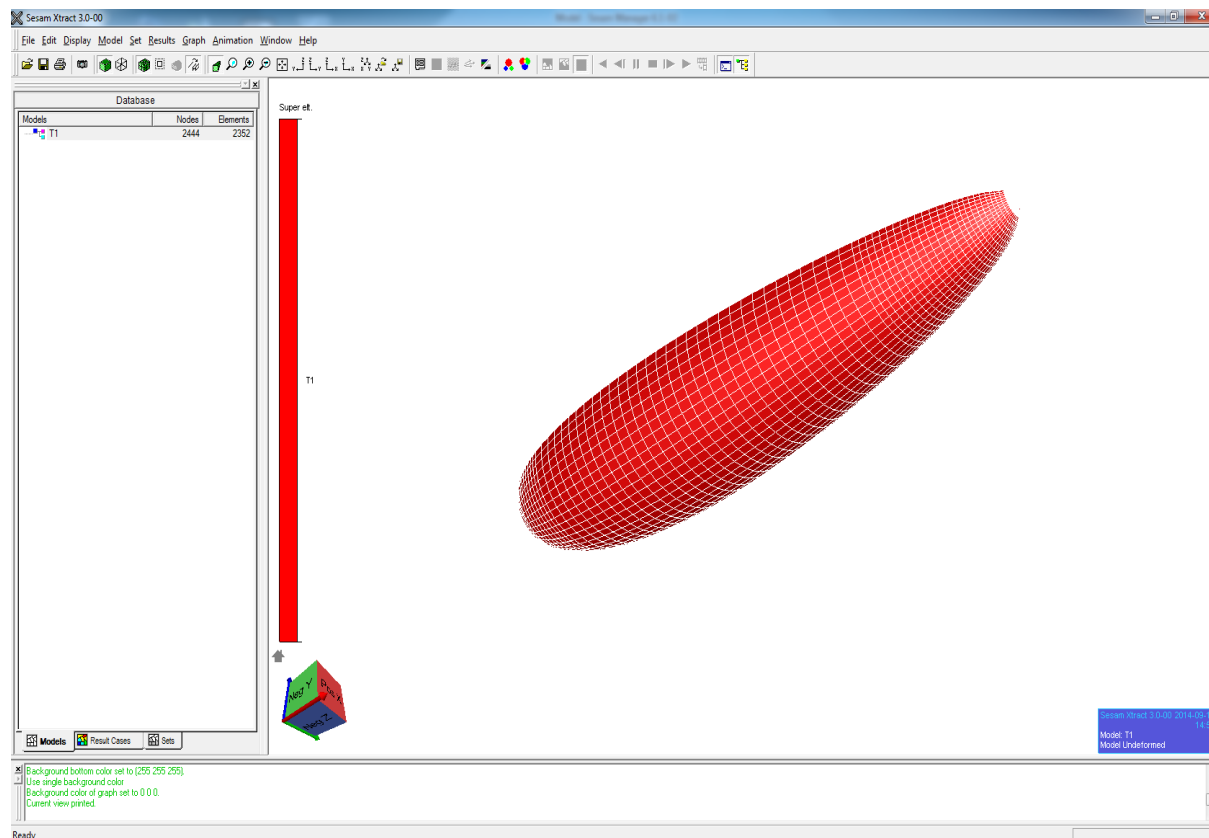
3.2 Generiranje ulaznih podataka

Formu broda bilo je potrebno napraviti u programu Prefem koji služi za modeliranje 3-D struktura. Forma broda je podjeljena na 49 rebra, stim da svako rebro ima po 15 točaka. Za izračun i prilagođavanje ulaznih podataka korišten je program Excell.

Nakon definiranja svih točaka rebara, podatke je bilo potrebno pripremiti za unos u program Prefem. Sve podatke je trebalo prebaciti u Notepad u odgovarajući oblik prema odredbama samog programa za generiranje modela. Program prvo generiran ravnina pravokutnog oblika koja se kasnije naredbom CHANGE POINT oblikuje u formu broda. Kraticom BPrp su se unosile točke rebara gdje oznaka „r“ označava broj rebra a kratica „p“ redni broj točke rebra (npr. rebro 3 točka 12 – BP0312) te u nastavku koordinate te točke (x,y,z). Koordinatni sustav u programu Prefem je postavljen u sredini broda tako da prvo rebro počinje od pramca (+ koordinata). Također je bilo potrebno uzeti u obzir i krajeve modela jer je nužno zatvoriti formu. Nakon toga sljedilo je stvaranje mreže elemenata.

U prilogu A dani su ulazni podaci iz Notepada koji su bili potrebni za definiranje modela.

Na sljedećoj slici prikazan je model napravljen u programu Prefem.



Slika 2. Model forme

Sljedeći korak je bio stvaranje ulazne datoteke za sam program Wadam također u Notepadu. On je sadržavao značajke broda (masu i duljinu), dubinu mora te karakteristike valova (amplitudu, period te kut nailaska).

Nakon što je napravljen model te postavljeni parametri za proračun bilo je moguće provesti proračun poniranja i posrtanja u programu Wadam.

Ispis rezultata i dijagrama se obradio pomoću programa Postresp koji je također dio paketa Sesam, [5].

3.3 Spektar valova

Spektar valova je zadan pomoću Bretschneiderov spektara. To je dvoparametarski spektar koji se koristi za otvorena mora, kako za potpuno razvijena mora tako i za valove koji tek nastaju.

Opći oblik je:

$$S_{\zeta}^B(\omega) = \frac{A}{\omega^5} e^{-\frac{B}{\omega^4}} \quad (3.4)$$

gdje su:

A,B-konstante pojedinog spektra koje ovise o parametrima spektra.

Najčešće se uzima:

$$A = \frac{173H_1^2}{\bar{T}^{\frac{3}{4}}} \quad (3.5)$$

$$B = \frac{-692}{\bar{T}^4} \quad (3.6)$$

gdje je:

$H_{1/3}$ -značajna valna visina

\bar{T} -karakteristični valni period

Za karakteristični valni period vrijedi:

$$\bar{T} = 1,086\bar{T}_z = 0,772T_m \quad (3.7)$$

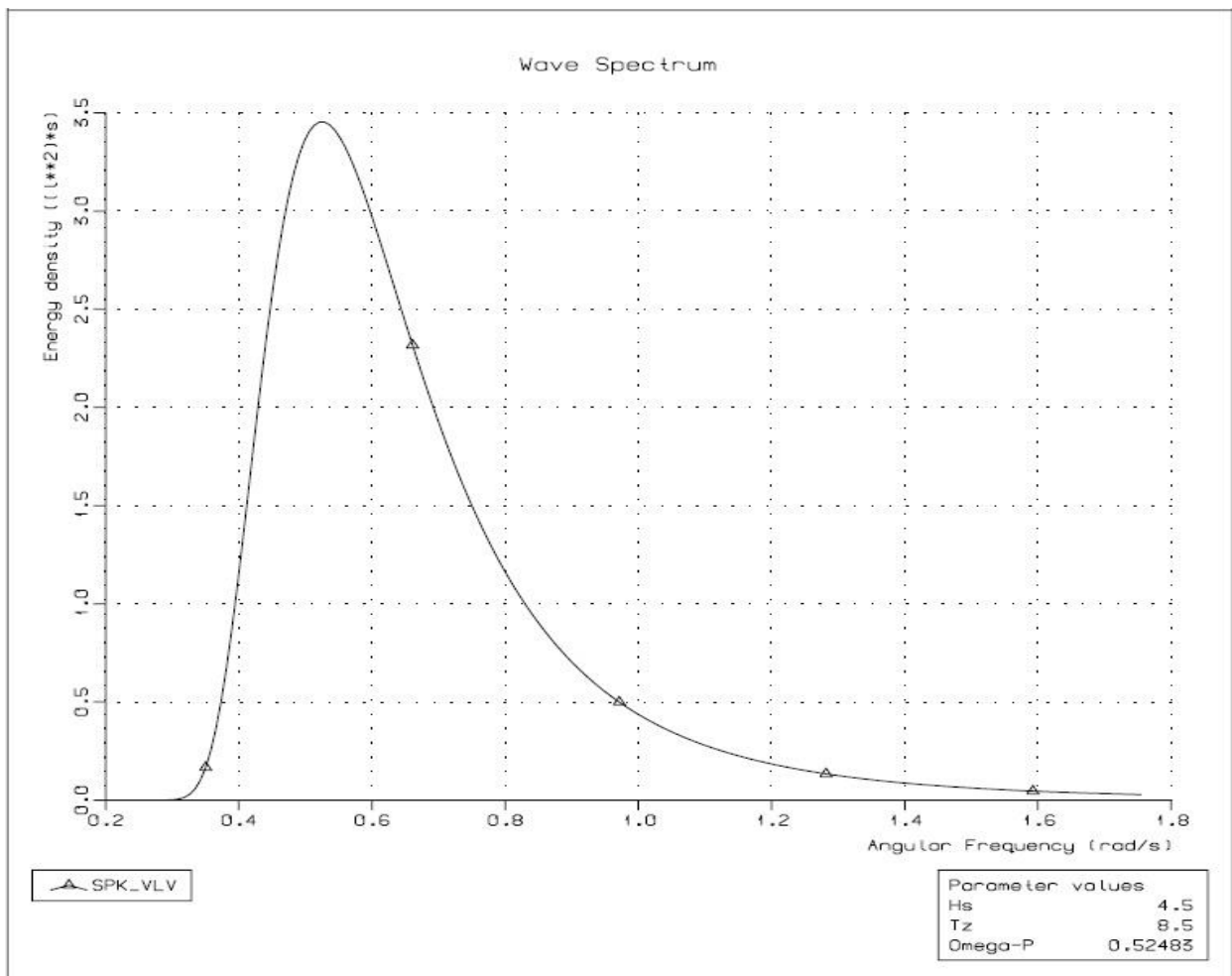
Bretschneiderov spektar naziva se još i modificirani dvoparametarski Pierson-Moskowitz spektar.

Značajna valna visina i dominirajući valni period bili su zadani u zadatku:

$$H_{1/3}=4,5 \text{ m}$$

$$\bar{T}=8,5 \text{ s}$$

Na račun tih podataka napravljen je spektar valova koji je prikazan na slici.



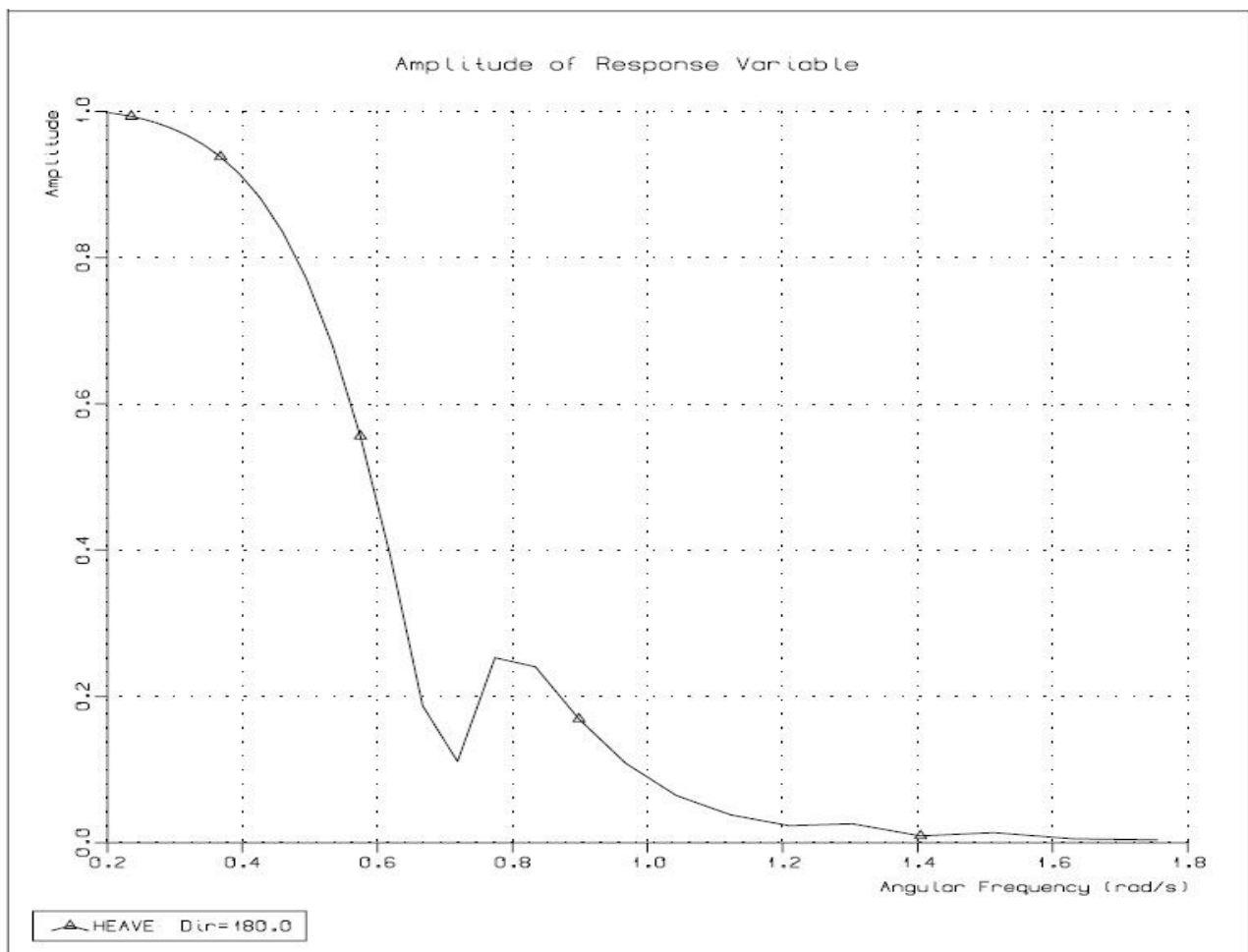
Slika 3. Spektar valova

3.4 Prikaz izlaznih rezultata

3.4.1 Prijenosna funkcija poniranja

Prijenosne funkcije kao i fazni pomak pojedinog oblika njihanja u odnosu na val dobiju rješenjem jednadžbi njihanja. Na vrlo dugačkim valovima, kada je frekvencija mala i kada su male dinamičke sile brod slijedi gibanje valne površine. Amplituda poniranja η_3 teži amplitudi vala ζ_a , pa na vrlo dugačkim valovima prijenosna funkcija teži jediničnoj vrijednosti.

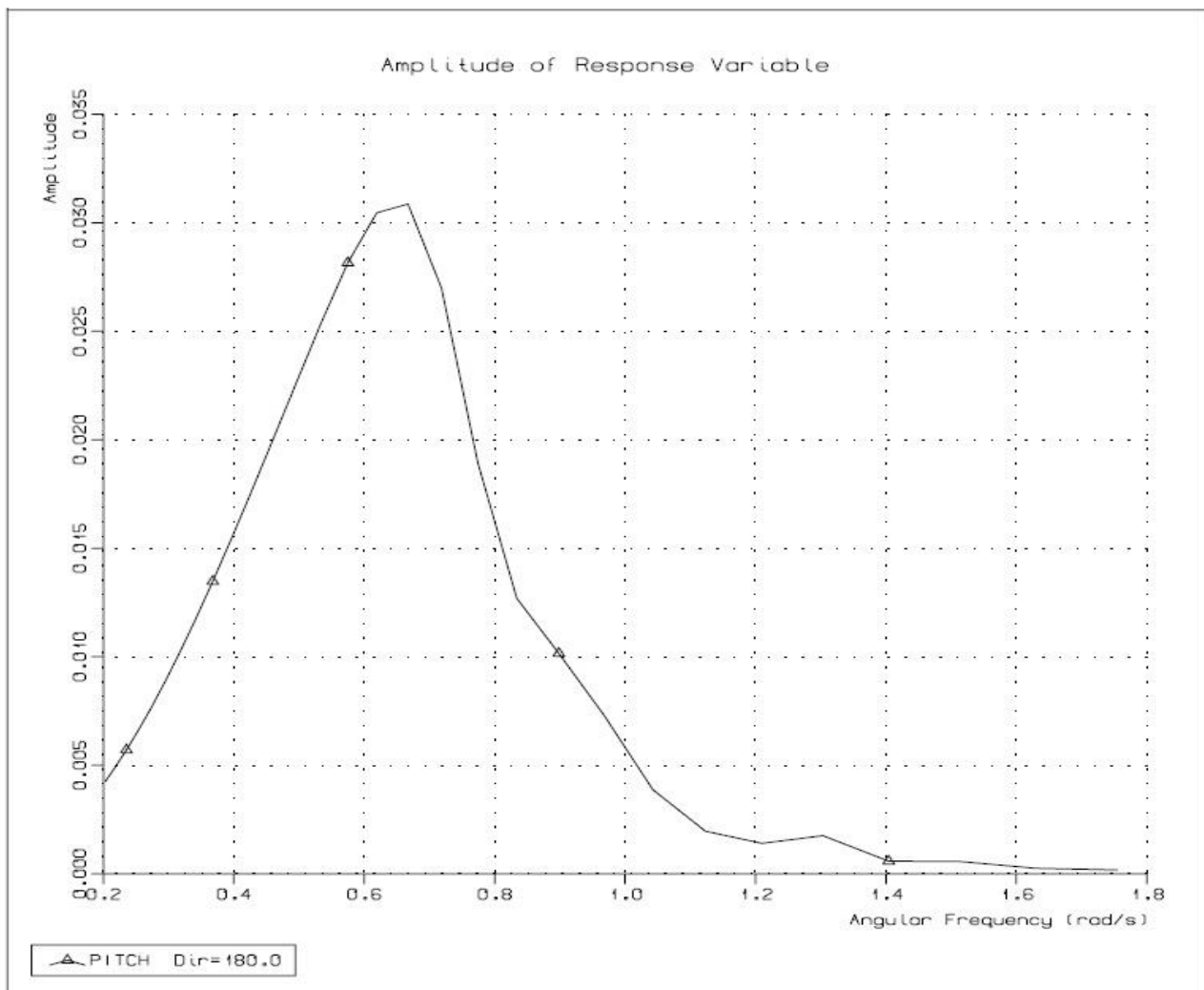
Pri većim frekvencijama, valovi postaju kraći i nemaju toliki utjecaj na trup pa prijenosna funkcija teži nuli. To je vidljivo na slici.



Slika 4. Prijenosna funkcija za poniranje

3.4.2 Prijenosna funkcija posrtanja

Pri jako dugačkim valovima (frekvencije male) posrtanje ne dolazi do izražaja pa prijenosna funkcija u tom području teži nuli. Isto vrijedi i za obrnuti slučaj kad su frekvencije veće, a valovi kraće što je vidljivo na sljedećem dijagramu.



Slika 5. Prijenosna funkcija posrtanja

3.4.3 Spektar odziva poniranja

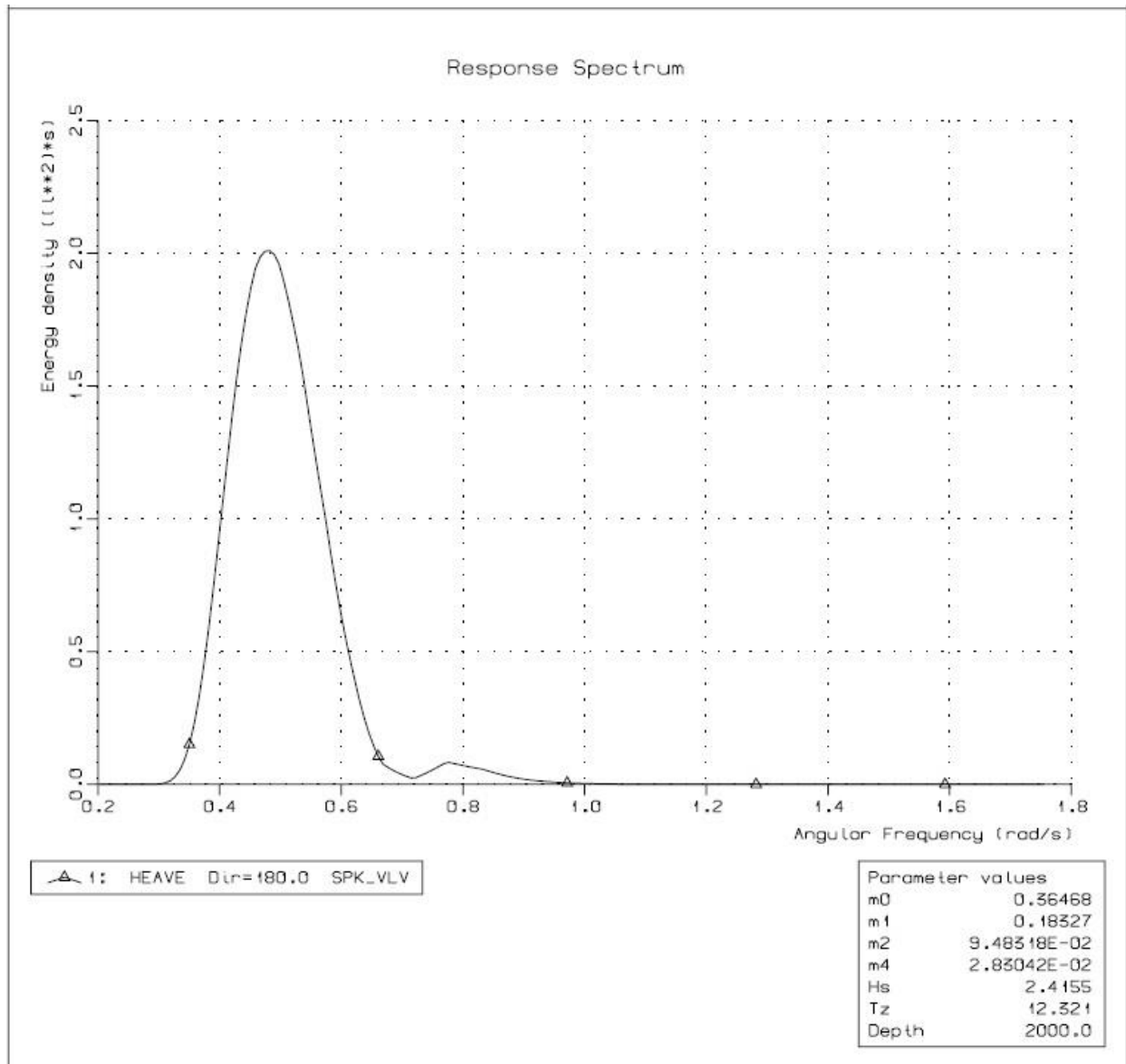
Spektar valova koristi se za određivanje odziva broda na nepravilnim valovima. Spektar odziva dobije se množenjem operatora amplitude odziva RAO i spektra valova S_{ζ} . Površina ispod spektra odziva dobije se kao nulti moment spektra:

$$m_{0R} = \int_0^{\infty} S_R(\omega_e) d\omega_e. \quad (3.8)$$

Svi ostali momenti spektra odziva za $n=1,2,\dots$ računaju se analogno momentima spektra valova:

$$m_{nR} = \int_0^{\infty} \omega_e^n S_R(\omega_e) d\omega_e. \quad (3.9)$$

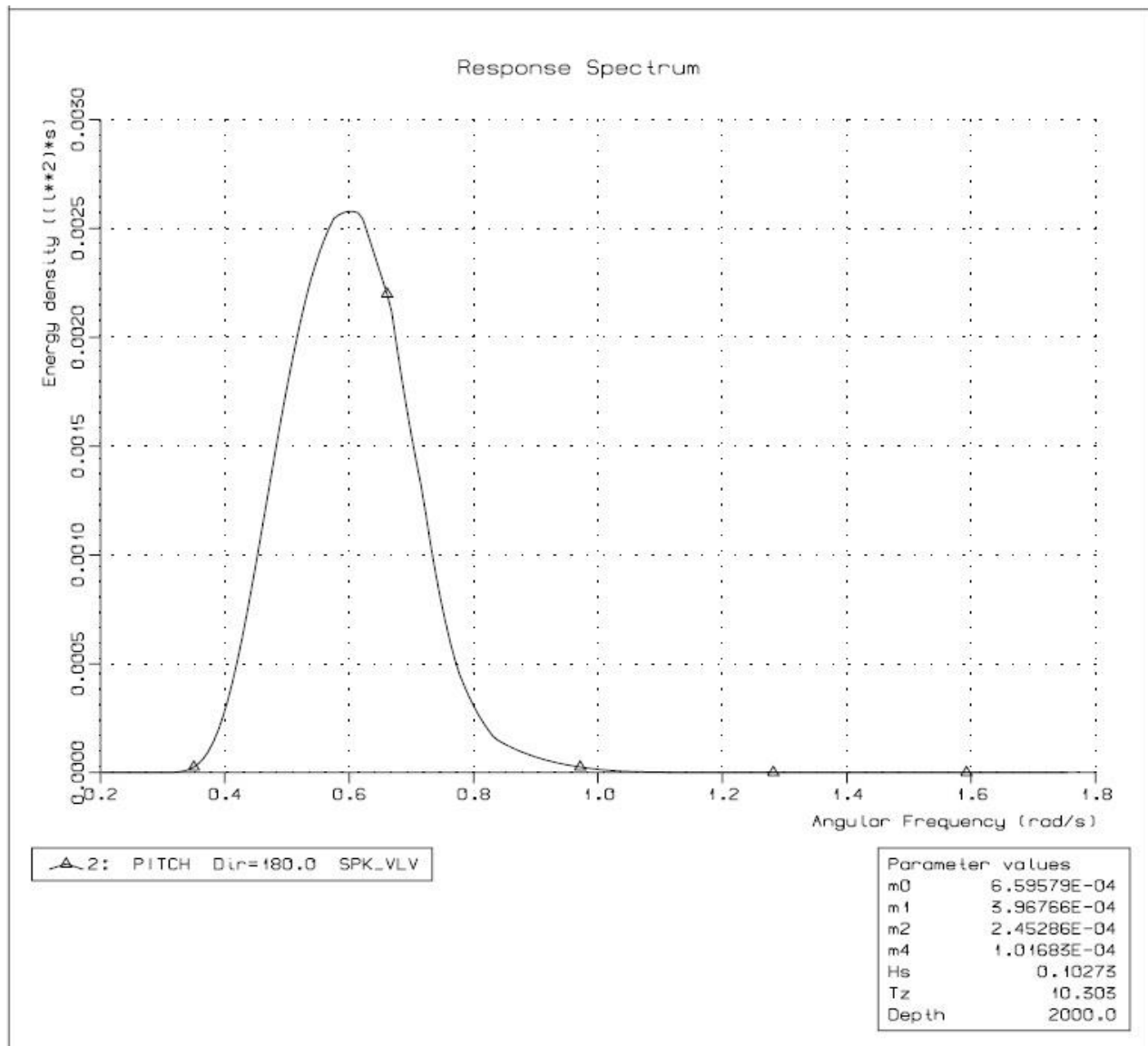
Dijagram na sljedećoj prikazuje funkciju spektra odziva poniranja koja postiže svoj maksimum na približnoj frekvenciji 0,675 rad/s.



Slika 6. Spektar odziva za poniranje

3.4.4 Spektar odziva posrtanja

Funkcija spektra odziva posrtanja postiže svoje maksimalne vrijednosti na približnoj frekvenciji 0,62 rad/s.



Slika 7. Spektar odziva za posrtanje

3.5 Značajne veličine

Tablice 3.3 i 3.4 prikazuju značajne veličine koje su dobivene proračunom u Wadamu.

Tablica 3. Značajne veličine iz spektra valova

Spektar valova		
H_s	4,5	m
T_z	8,5	s
ω_e	0,52483	rad/s

Tablica 4. Prikaz značajnih veličina za spektar odziva poniranja i posrtanja

Spektar odziva poniranja			Spektar odziva posrtanja		
m_0	0,36468	m^2	m_0	0,000659579	m^2
m_1	0,18327	$m^2 s^{-1}$	m_1	0,000396766	$m^2 s^{-1}$
m_2	0,0948318	$m^2 s^{-2}$	m_2	0,000245286	$m^2 s^{-2}$
m_4	0,0283042	$m^2 s^{-4}$	m_4	0,000101683	$m^2 s^{-4}$
H_s	2,4155	m	H_s	0,10273	m
T_z	12,321	s	T_z	10,303	s

4. USPOREDBA REZULTATA

Nakon provedenog proračuna 3-D metodom rubnih elemenata u Wadamu dobiveni rezultati uspoređeni su sa vrpčastom metodom koju je kolegica provela u programu Waveshipu koji je također dio programskog paketa Sesam.

U tablicama 5. i 6. je prikazana usporedba značajnih veličina.

Tablica 5. Usporedba spektralnih momenata poniranja dobivenih Wadamom i Waveshipom

Spektar odziva poniranja- WADAM			Spektar odziva poniranja- WAVESHIP		
m_0	0,36468	m^2	m_0	0,36979	m^2
m_1	0,18327	m^2	m_1	0,18547	m^2
m_2	0,0948318	m^2	m_2	0,0953455	m^2
m_4	0,0283042	m^2	m_4	0,0273622	m^2
H_s	2,4155	m	H_s	2,4324	m
Tz	12,321	s	Tz	12,374	s

Tablica 6. Usporedba spektralnih momenata posrtanja dobivenih Wadamom i Waveshipom

Spektar odziva posrtanja- WADAM			Spektar odziva posrtanja- WAVESHIP		
m_0	0,000659579	m^2	m_0	0,000544742	m^2
m_1	0,000396766	m^2	m_1	0,000317339	m^2
m_2	0,000245286	m^2	m_2	0,000189446	m^2
m_4	0,000101683	m^2	m_4	0,0000725519	m^2
H_s	0,10273	m	H_s	0,0933588	m
Tz	10,303	s	Tz	10,654	s

Ovim prikazom smo pokazali da za ovaj slučaj 3-D panel metoda daje približno jednake rezultate kao i primitivnija vrpčasta metoda. Osjetne razlike prikazale bi se na modelima kompliciranije forme.

5. ZAKLJUČAK

U ovom završnom radu napravljen je proračun odziva pravilnog tijela na valovima u pramac. Navedeno pravilno tijelo definirano je matematičkim izrazom, a sastoji se od niza kružnih presjeka podjeljenih na N panela. Proračun se temeljio na potencijalnoj teoriji 3-D metode rubnih elemenata. Sam numerički proračun proveden je pomoću programskog paketa Sesam, tj. programa Wadam, Prefem i Postresp. Dobivene su vrijednosti dodatne mase, prigušenja, vanjskih sila te spektri odziva.

Također je provedena usporedba s rezultatima proračuna koji je proveden 2-D Vrpčastom metodom u programu Waveship za isto stanje mora i topologiju trupa. Usporedba je pokazala vrlo dobro slaganje između spektara odziva odnosno slaganje spektralnih momenata.

6. LITERATURA

- [1] Čorić V., Prpić- Oršić J.: „Pomorstvenost plovnih objekata“, Zigo, Rijeka, 2006.
- [2] Journee J.M.J., Massie W.W.: „Offshore hydromechanics“, Delft University of Technology, 2001
- [3] Radan D.: „Uvod u hidrodinamiku broda“, Sveučilište u Dubrovniku, 2004.
- [4] Sesam, User manual Wadam, Developed and Marketed by DET NORSKE VERITAS, 2010
- [5] Sesam, User manual, Developed and Marketed by DET NORSKE VERITAS, 2008

PRILOG A

Ulazni podaci za generiranje modela u programu Prefem

U prilogu je prikazan samo mali dio ulaznih zbog velike veličine same datoteke.

```
%%%%%%%%% ZAVRSNI RAD
```

```
%%%%%%%%% GENERIRANJE POVRŠINE
```

```
GENERATE SURFACE B 1 49 1 1 1 15 1 1 END
```

```
CARTESIAN 0.0 0.0 0.0
```

```
REPEAT 48 1.0 0.0 0.0
```

```
REPEAT 14 0 1. 0
```

```
END END
```

```
CHANGE POINT
```

```
%
```

```
% Rebro 1
```

```
BP0101      60.735 0.000  13.149
```

```
BP0102      60.735 0.319  13.167
```

```
BP0103      60.735 0.634  13.220
```

```
BP0104      60.735 0.942  13.309
```

```
BP0105      60.735 1.237  13.431
```

```
BP0106      60.735 1.517  13.586
```

```
BP0107      60.735 1.778  13.771
```

```
BP0108      60.735 2.016  13.984
```

```
BP0109      60.735 2.229  14.222
```

BP0110	60.735	2.414	14.483
BP0111	60.735	2.569	14.763
BP0112	60.735	2.691	15.058
BP0113	60.735	2.780	15.366
BP0114	60.735	2.833	15.681
BP0115	60.735	2.851	16.000

%

.....

% Rebro 49

BP4901	-60.735	0.000	11.300
BP4902	-60.735	0.526	11.329
BP4903	-60.735	1.046	11.418
BP4904	-60.735	1.552	11.563
BP4905	-60.735	2.039	11.765
BP4906	-60.735	2.501	12.020
BP4907	-60.735	2.931	12.325
BP4908	-60.735	3.324	12.676
BP4909	-60.735	3.675	13.069
BP4910	-60.735	3.980	13.499
BP4911	-60.735	4.235	13.961
BP4912	-60.735	4.437	14.448
BP4913	-60.735	4.582	14.954
BP4914	-60.735	4.671	15.474

BP4915 -60.735 4.700 16.000

%

END

END

SET NUMBEROF-ELEMENTS (BI01&&) 4

END

END

.....
SET NUMBEROF-ELEMENTS (BI43&&) 2

END

END

DEFINE POINT PRAMAC 60.735 0 16

KRMA -60.735 0 16

END

END

DEFINE LINE KRMA1 BP4915 KRMA 10

KRMA2 BP4901 KRMA 10

END

END

DEFINE SURFACE KRMAPOV KRMA1 BJ4914 BJ4913 BJ4912 BJ4911 BJ4910 BJ4909
BJ4908 BJ4907 BJ4906 BJ4905 BJ4904 BJ4903 BJ4902 BJ4901 KRMA2

END

END

DEFINE LINE PRAMAC1 PRAMAC BP0115 10

PRAMAC2 PRAMAC BP0101 10

END

END

DEFINE SURFACE PRAMPOV PRAMAC1 BJ0114 BJ0113 BJ0112 BJ0111 BJ0110 BJ0109
BJ0108 BJ0107 BJ0106 BJ0105 BJ0104 BJ0103 BJ0102 BJ0101 PRAMAC2

END

END

% zrcaljenje

DEFINE POINT

ZP1 0.0 1 0

ZP2 0.0 -1 0

END

END

DEFINE TRANSFORMATION ZRC MIRROR ZP1 ZP2 END

END

COPY ALL-SURFACES-INCLUDED C* ZRC

%%%%%%%%% HYDRO-PRESSURE %%%%%%%%%%

%%%%%%%%% ODREĐIVANJE OPTERECENJA NA POVRŠINI
%%%%%%%%%

PROPERTY LOAD 1 HYDRO-PRESSURE ALL-SURFACES-INCLUDED OUTSIDE MIDDLE-SURFACE

HYDRO-PRESSURE PRAMPOV INSIDE MIDDLE-SURFACE

HYDRO-PRESSURE CRAMPOV INSIDE MIDDLE-SURFACE

END

END

%%%%%%%%% NAREDBA ZA GENERIRANJE PANELA %%%%%%%%%%

SET ELEMENT-TYPE SURFACE ALL-SURFACES-INCLUDED SHELL-4NODES END

END

MESH ALL

WRITE 1

PRILOG B

Ulazni podaci za proračun u programu Wadam

% DULINA U M

% MASA U T

%

% DEFINE GENERAL INFORMATION ABOUT THE MODEL

%

DEFINE

GENERAL ANALYSIS-MODELS MASS-MODEL GLOBAL-MASS-MATRIX USER-SPECIFIED -7.73 0. 16.0 8.0 28.54 28.54 0.000 0.000 0.000 34660.4 SINK-SOURCE-MODEL 1
END

%

%

CONSTANTS 124.0 1.0 9.81 0. -16.0 0. 0. 0.

%

%

EXECUTION-DIRECTIVES ANALYSIS-TYPE GLOBAL-RESPONSE HORIZONTAL-DRIFT
YES FIXED-FLOATING FLOATING NONE YES OUTPUT-FORMAT FREQUENCY-DOMAIN
POTENTIAL-THEORY EQUATION-SOLUTION DIRECT IRREGULAR-FREQUENCY
REMOVE 1. LOGARITHM-SINGULARITY NUMERICAL NUMERICAL-INTEGRATION-
TYPE FOUR-NODE-GAUSSIAN END

%

PRINT-SWITCH NORMAL-PRINT RESULT-FILES GLOBAL-RESPONSE SIU-
UNFORMATTED END END

%

%

TEXT ' MODEL - MODEL' ' ' GLOBAL MOTIONS RESPONSE ANALYSIS'

END

%

%

ENVIRONMENT WATER-DEPTH 2000.0

WAVE-DIRECTION 180.0 END

WAVE-LENGTH

%

20.000 INFINITE 23.213 INFINITE 26.933 INFINITE 31.260 INFINITE 36.282 INFINITE 42.110
INFINITE 48.868 INFINITE 56.705 INFINITE 65.807 INFINITE 76.372 INFINITE 88.635
INFINITE 102.870 INFINITE 119.387 INFINITE 138.545 INFINITE 160.791 INFINITE 186.595
INFINITE 216.554 INFINITE 251.311 INFINITE 291.660 INFINITE 338.483 INFINITE 392.820
INFINITE 455.874 INFINITE 529.058 INFINITE 613.986 INFINITE 712.554 INFINITE 826.944
INFINITE 959.686 INFINITE 1113.743 INFINITE 1292.539 INFINITE 1500.000 INFINITE

%

END

PRILOG B

Dodatni grafovi koji nisu prikazani u poglavlju 3. (grafovi dodatne mase, prigušenja i sile)

