

# Procjena ukupnog sunčevog zračenja za pomorske solarne sustave

---

Ilić, Luka

Undergraduate thesis / Završni 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:235:538575>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-04-16**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Luka Ilić**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatipović

Student:

Luka Ilić

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se mentoru Izv. prof. dr. sc. Ivanu Čatipoviću na korisnim savjetima, strpljenju i razumijevanju tijekom mog studiranja i prilikom izrade ovog završnog rada.

Zahvaljujem se svojoj obitelji, a posebno roditeljima i sestri što su mi bili podrška kroz cijeli život pa tako i kroz studij.

Zahvaljujem se svojoj djevojci jer je vjerovala u mene i bila mi podrška kad mi je to bilo najpotrebnije.

Luka Ilić

|                                     |        |
|-------------------------------------|--------|
| Sveučilište u Zagrebu               |        |
| Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum: 27-09-2021                   | Prilog |
| Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1        |        |
| Ur.broj: 15 - 1703 - 21 - 868       |        |

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Luka Ilić**

Mat. br.: 0035207352

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Procjena ukupnog sunčevog zračenja za pomorske solarne sustave**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Estimation of total solar radiation for marine solar systems**

Opis zadatka:

Solarni sustavi sve češću primjenu nalaze na pomorskim objektima kao što su uobičajeni trgovački brodovi ili objekti za iskorištavanje nafte i plina. U novije vrijeme razmatra se korištenje pomorskih solarnih sustava u kombinaciji s drugim sustavima za iskorištavanje obnovljivih izvora energije (npr. vjetroturbine). Tema istraživanja su također i samostalni pomorski solarni sustavi koji su projektirani isključivo za iskorištavanje sunčeve energije.

Uobičajeni način procjene ukupnog sunčevog zračenja pretpostavlja nepomični izloženu površinu razmatranog sustava. Kod primjene na pomorskim objektima to ne može biti slučaj jer se svaki plovni objekt uslijed nailaska valova giba te svojom gibanjem uzrokuje drugačiji relativni položaj izložene površine u odnosu na sunce. Tema ovog završnog rada je provesti procjenu ukupnog sunčevog zračenja koja uključuje gibanje izložene površine.

U okviru završnog rada potrebno je:

1. Modelirati formu odabranog pomorskog objekta.
2. Odabrati reprezentativna stanja mora za zadanu lokaciju.
3. Provesti proračun prijenosnih funkcija.
4. Provesti proračun ukupnog sunčevog zračenja za zadanu izloženu površinu.
5. Napraviti sistematičan prikaz dobivenih rezultata.

Zadatak zadan:  
30. studenoga 2020.

Datum predaje rada:  
1. rok: 18. veljače 2021.  
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.  
3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:  
1. rok: 22.2. – 26.2.2021.  
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.  
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Zadatak zadao:

*Čatipović*

Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatipović

Predsjednik Povjerenstva:

*Čatipović*

Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatipović

## SADRŽAJ

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. UVOD.....                                                                          | 1  |
| 2. SUNČEVA ENERGIJA .....                                                             | 2  |
| 2.1. Sunčevo zračenje.....                                                            | 2  |
| 2.1.1. Položaj sunca.....                                                             | 3  |
| 2.1.2. Komponente Sunčeva zračenja koje dopire do zemlje.....                         | 3  |
| 3. POMORSTVENOST PLOVNIH OBJEKATA .....                                               | 6  |
| 3.1. Linearna teorija valova.....                                                     | 6  |
| 3.1.1. Osnove teorijske hidromehanike u teoriji vala.....                             | 6  |
| 3.1.2. Harmonijski ravninski valovi .....                                             | 10 |
| 3.1.3. Potencijalna teorija .....                                                     | 11 |
| 3.1.3.1 Rubni uvjeti .....                                                            | 11 |
| 3.2. Morski valovi .....                                                              | 12 |
| 3.2.1 Spektri energije morskih valova.....                                            | 13 |
| 3.2.2 Teorijski spektri energije.....                                                 | 13 |
| 3.3. Model njihanja broda .....                                                       | 14 |
| 3.3.1. Dinamička ravnoteža njihanja.....                                              | 15 |
| 3.3.2. Jednadžba dinamičke ravnoteže njihanja devet susjednih plutajućih tijela ..... | 19 |
| 3.3.3. Prijenosne funkcije .....                                                      | 19 |
| 3.4. Odziv broda na morskim valovima .....                                            | 19 |
| 4. PRORAČUN INSOLACIJE IZLOŽENE POVRŠINE PLUTAJUĆEG TIJELA.....                       | 20 |
| 4.1. Opis programskog paketa HydroStar .....                                          | 20 |
| 4.2. Priprema podataka za HydroStar.....                                              | 20 |
| 4.3. Proračun difrakcije i radijacije .....                                           | 24 |
| 4.4. Proračun gibanja.....                                                            | 24 |
| 4.4.1. Spoj između pontona.....                                                       | 27 |
| 4.5. Prijenosne funkcije .....                                                        | 30 |
| 4.6. Spektralna analiza odziva.....                                                   | 37 |
| 4.6.1. Ponton 1.....                                                                  | 38 |
| 4.6.2. Ponton 4.....                                                                  | 39 |
| 4.6.3. Ponton 9.....                                                                  | 40 |
| 4.7. Računanje utjecaja ljuljanja i posrtanja na insolaciju .....                     | 41 |
| LITERATURA.....                                                                       | 43 |
| PRILOZI.....                                                                          | 44 |
| PRILOG I – Prikazi prijenosnih funkcija ljuljanja i valjanja svih pontona .....       | 45 |

---

**POPIS SLIKA**

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1. Spektar sunčeva zračenja [4].....                             | 2  |
| Slika 2. Solarni kutovi za proizvoljno orijentirane površine [6] ..... | 3  |
| Slika 3. Oblici njihanja na harmonijskim valovima [3] .....            | 14 |
| Slika 4. Kutovi nailaska vala na brod [3] .....                        | 15 |
| Slika 5. Prikaz pontona sa solarnim panelima na palubi.....            | 20 |
| Slika 6. Prikaz glavnih dimenzija.....                                 | 21 |
| Slika 7. Raspored pontona i koordinate rubnih točaka.....              | 21 |
| Slika 8. Prikaz načina upisivanja koordinata čvorova.....              | 22 |
| Slika 9. Prikaz načina definiranja panela .....                        | 22 |
| Slika 10. Prikaz .rdf datoteke .....                                   | 24 |
| Slika 11. Prikaz .mcn datoteke .....                                   | 25 |
| Slika 12. Prikaz pontona i koordinata njihovih težišta.....            | 26 |
| Slika 13. Prikaz pontona u ravnotežnom položaju .....                  | 27 |
| Slika 14. Prikaz pontona u nekom vremenskom trenutku $t$ .....         | 27 |
| Slika 15. Prikaz pomaka razmatranih pontona.....                       | 28 |
| Slika 16. Prikaz prijenosnih funkcija pontona 1 za ljuljanje.....      | 31 |
| Slika 17. Prikaz prijenosnih funkcija pontona 4 za ljuljanje.....      | 32 |
| Slika 18. Prikaz prijenosnih funkcija pontona 9 za ljuljanje.....      | 33 |
| Slika 19. Prikaz prijenosnih funkcija pontona 1 za posrtanje .....     | 34 |
| Slika 20. Prikaz prijenosnih funkcija pontona 4 za posrtanje .....     | 35 |
| Slika 21. Prikaz prijenosnih funkcija pontona 9 za posrtanje .....     | 36 |

---

**POPIS TABLICA**

|                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------|----|
| Tablica 1. Izlazni podaci za posrtanje $H_s = 1,5$ m .....  | 38 |
| Tablica 2. Izlazni podaci za ljuljanje $H_s = 1,5$ m .....  | 38 |
| Tablica 3. Izlazni podaci za posrtanje $H_s = 2,5$ m .....  | 38 |
| Tablica 4. Izlazni podaci za ljuljanje $H_s = 2,5$ m .....  | 38 |
| Tablica 5. Izlazni podaci za posrtanje $H_s = 1,5$ m .....  | 39 |
| Tablica 6. Izlazni podaci za ljuljanje $H_s = 1,5$ m .....  | 39 |
| Tablica 7. Izlazni podaci za posrtanje $H_s = 2,5$ m .....  | 39 |
| Tablica 8. Izlazni podaci za ljuljanje $H_s = 2,5$ m .....  | 39 |
| Tablica 9. Izlazni podaci za posrtanje $H_s = 1,5$ m .....  | 40 |
| Tablica 10. Izlazni podaci za ljuljanje $H_s = 1,5$ m ..... | 40 |
| Tablica 11. Izlazni podaci za posrtanje $H_s = 2,5$ m ..... | 40 |
| Tablica 12. Izlazni podaci za ljuljanje $H_s = 2,5$ m ..... | 40 |
| Tablica 13. Prikaz rezultata .....                          | 41 |

**POPIS OZNAKA**

| Oznaka                               | Jedinica              | Opis                                                    |
|--------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------------|
| $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ | -                     | jedinični vektori u smjeru osi $x, y$ i $z$ redosljedno |
| $\rho$                               | $\text{kg/m}^3$       | gustoća morske vode                                     |
| $p$                                  | Pa                    | tlak                                                    |
| $g$                                  | $\text{m/s}^2$        | ubrzanje zemljine sile teže                             |
| $z$                                  | m                     | geodetska visina                                        |
| $\Phi_w$                             | $\text{m}^2/\text{s}$ | potencijal brzine strujanja vala                        |
| $\Phi$                               | $\text{m}^2/\text{s}$ | potencijal brzine strujanja                             |
| $\Psi$                               | $\text{m}^2/\text{s}$ | strujna funkcija                                        |
| $\zeta$                              | m                     | elevacija vala                                          |
| $\zeta_a$                            | m                     | valna amplituda                                         |
| $\omega$                             | $\text{rad/s}$        | valna frekvencija                                       |
| $\omega_m$                           | $\text{rad/s}$        | modalna frekvencija                                     |
| $k$                                  | $\text{rad/m}$        | valni broj                                              |
| $d$                                  | m                     | dubina vode                                             |
| $H$                                  | m                     | valna visina                                            |
| $\lambda$                            | m                     | valna duljina                                           |
| $T$                                  | s                     | valni period                                            |
| $\mathbf{v}$                         | -                     | vektor brzine strujanja fluida                          |
| $\beta$                              | °                     | kursni kut                                              |
| $M_{jk}$                             | -                     | matrica mase tijela                                     |
| $A_{jk}$                             | -                     | matrica pridruženih masa                                |
| $B_{jk}$                             | -                     | matrica hidrodinamičkog prigušenja                      |
| $C_{jk}$                             | -                     | matrica krutosti povratnih hidrostatskih sila           |
| $A_{wl}$                             | $\text{m}^2$          | površina vodne linije                                   |
| $\omega_e$                           | $\text{rad/s}$        | susretna frekvencija                                    |
| $\eta_{aj}$                          | m                     | realna vrijednost amplitude njihanja ( $i=1,2,3$ )      |
| RAO                                  | -                     | operator amplitude odziva                               |

|                     |         |                                               |
|---------------------|---------|-----------------------------------------------|
| $H_{1/3}$           | m       | značajna valna visina                         |
| $F_i$               |         | amplituda uzbudne sile ( $i=x,y,z$ )          |
| $M_i$               | Nm      | amplituda uzbudnog momenta ( $i=x,y,z$ )      |
| $S_{\zeta}(\omega)$ | $m^2/s$ | spektar valova                                |
| $S_{Ri}(\omega)$    | $m^2/s$ | spektar odziva ( $i=1 \dots 6$ )              |
| $m_0$               | $m^2$   | nulti spektralni moment                       |
| $I$                 | $m^2kg$ | moment tromosti mase                          |
| $\vec{u}$           | -       | vektor relativne udaljenosti spojeva          |
| $\vec{\delta}$      | -       | vektor translatorskih pomaka                  |
| $\vec{\alpha}$      | -       | vektor kutnih pomaka                          |
| $r$                 | m       | radijus tromosti                              |
| $\vec{F}_i$         | N       | sila koja djeluje na ponton i                 |
| $\vec{M}_i$         | Nm      | moment oko referentne točke                   |
| $[K_s]$             | N/m     | matrica krutosti spojeva pontona              |
| $I_{uk}$            | $W/m^2$ | ukupno zračenje sunca                         |
| $I_D$               | $W/m^2$ | intenzitet direktnog sunčevog zračenja        |
| $I_d$               | $W/m^2$ | intenzitet difuznog zračenja neba             |
| $I_r$               | $W/m^2$ | intenzitet reflektirajućeg zračenja           |
| $I_{DN}$            | $W/m^2$ | intenzitet sunčevog zračenja na okomitu plohu |
| $A$                 | -       | sunčevo zračenje na granici atmosfere         |
| $B$                 | -       | koeficijent atmosferskog prigušenja           |

---

**SAŽETAK**

Cilj ovog završnog rada bio je provesti procjenu ukupnog sunčevog zračenja na gibajuće površine 9 plutajućih pontona koji se nalaze u neposrednoj blizini. U proračun su uključene sile valova prvog reda kao i hidrodinamičke reakcije, tj. dodatna masa i radijacijsko prigušenje.

Proračun se temelji na teoriji potencijalnog strujanja. Pontoni su u razmatranom slučaju povezani te imaju značajno smanjene vrijednosti translatorskih pomaka u horizontalnoj ravnini i zaošijanja, stoga su za procjenu izloženosti površine sunčevom zračenju u obzir uzeta samo rotacijska gibanja oko osi  $x$  i  $y$  odnosno ljučenje i posrtanje. Pontoni su simetrični i postavljeni su simetrično u polje koje se sastoji od 3 reda i 3 stupca. Rad je napravljen pomoću programskog paketa HYDROSTAR (Bureau Veritas) koji se temelji na linearnoj teoriji potencijalnog strujanja i trodimenzionalnoj metodi rubnih elemenata.

Ključne riječi: sunčevo zračenje, hidrodinamičke reakcije, potencijalno strujanje, metoda rubnih elemenata

---

**SUMMARY**

The aim of this final assignment was to assess total sun radiation on surfaces of 9 floating pontoons which are in close proximity. The calculation contains first order wave forces as well as hydrodynamic reactions, i.e. added mass and radiation damping. Calculation is based on potential flow theory. In this case pontoons are connected and have significantly reduced values of translatory movements in horizontal plane and yaw, therefore only rotational movements around  $x$  and  $y$  axis are used in assessment of total sun radiation. Pontoons are symmetrical and are placed in symmetric field of 3 rows and 3 columns. This assignment was made using HYDROSTAR (Bureau Veritas) software package which is based on potential flow theory and three-dimensional boundary element method.

Key words: sun radiation, hydrodynamic reactions, potential flow, boundary element method

## 1. UVOD

Pobuđivanje čovjekove ekološke svijesti potaknuto klimatskim promjenama i raznim ekološkim katastrofama stvorilo je težnju za većim iskorištavanjem obnovljivih izvora energije. Industrijska proizvodnja i transport su prepoznati kao jedni od najvećih zagađivača okoliša pa tako neiscrpna Sunčeva energija kao obnovljivi izvor energije pronalazi sve veću primjenu u brodogradnji i pomorskoj tehnici te tako doprinosi smanjenju potrošnje goriva odnosno smanjenju emisije stakleničkih plinova. Učinkovitost solarnih sustava direktno je povezana s količinom sunčeve energije koja pada na površine panela i kolektora, odnosno s orijentacijom i nagibom tih površina. Na kopnu, gdje su takvi sustavi do sad našli najveću primjenu, orijentacija i nagib panela su najčešće konstantni pa se postavljaju u optimalan položaj prema suncu s obzirom na geografsku lokaciju na kojoj se postavljaju. Međutim kod pomorskih solarnih sustava, nalazili se oni na plovilima ili drugim plutajućim objektima, orijentacija i nagib određeni su gibanjem objekta na kojem se nalaze. Na gibanje tih objekata značajno utječu valovi i vjetar. Kako bi mogli vidjeti kako se plutajući objekt ponaša na valovitom moru te procijeniti insolaciju izložene površine potrebno je provesti proračun pomorstvenosti.

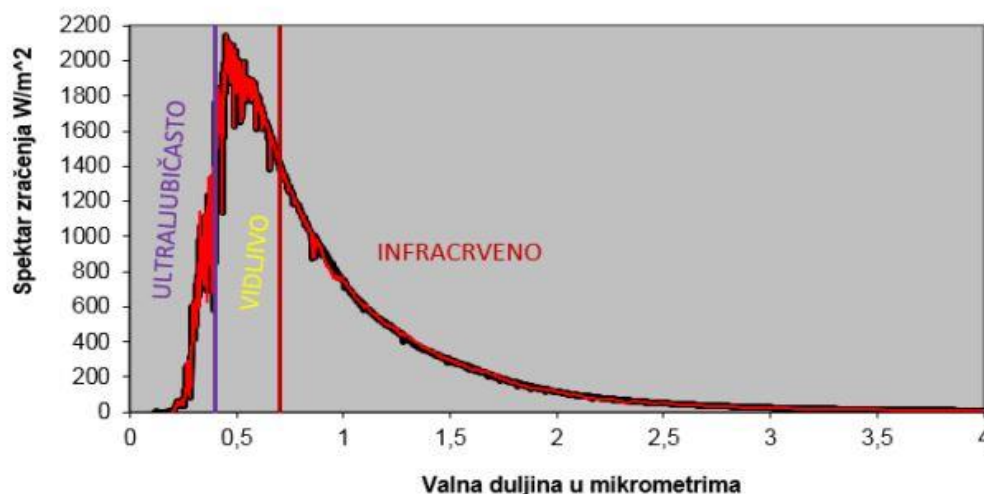
## 2. SUNČEVA ENERGIJA

Sunčeva energija je izvor života na Zemlji. Ona potječe od nuklearnih reakcija u sunčevom središtu. Radi se o reakciji fuzije vodikovih atoma iz koje nastaje helij, uz oslobađanje velike količine energije. Ta se energija širi u svemir zračenjem pa tako jednim dijelom dolazi i do Zemlje. Prema raspoloživim zalihama vodika može se izračunati da će Sunce zračiti još otprilike 5 milijardi godina, stoga sunce predstavlja praktički neiscrpan izvor energije, [5]. Zato sunčeva energija spada u skupinu obnovljivih izvora energije te se iskorištava pomoću toplinskih strojeva i fotonaponskih sustava.

### 2.1. Sunčevo zračenje

Sunčevo zračenje je po svojoj prirodi elektromagnetsko zračenje. Elektromagnetski valovi razlikuju se po načinu nastanka pa se dijele na radiovalove, mikrovalove, toplinske valove, vidljivu svjetlost, ultraljubičasto zračenje, rendgensko zračenje i gama zračenje. Elektromagnetski valovi se od sunca šire brzinom svjetlosti. Spektar Sunčevog zračenja može se podijeliti u tri glavna područja:

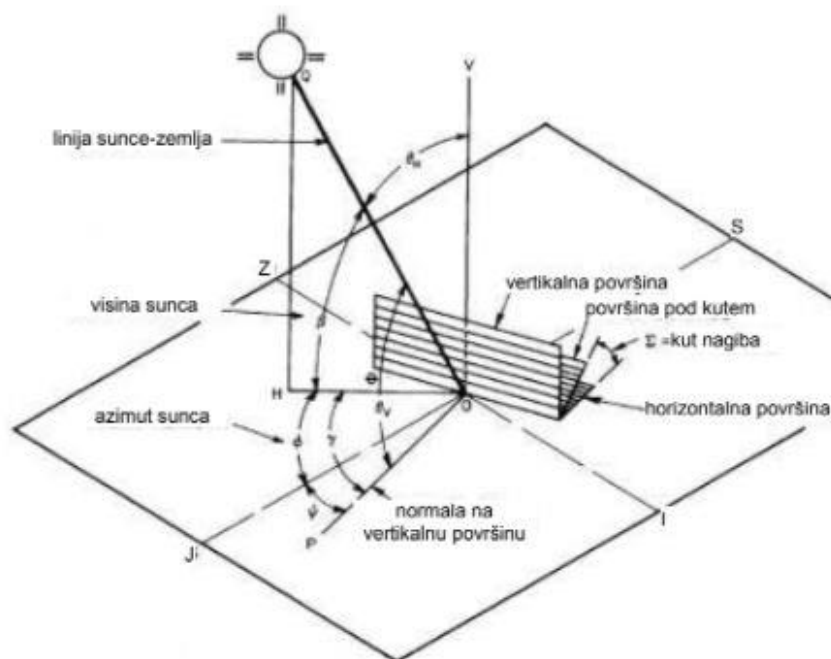
- |                                                                        |              |
|------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 1. Ultraljubičasto područje ( $\lambda < 0.4 \mu\text{m}$ )            | 5% zračenja  |
| 2. Vidljivo područje ( $0.4 \mu\text{m} < \lambda < 0.7 \mu\text{m}$ ) | 43% zračenja |
| 3. Infracrveno područje ( $\lambda > 0.7 \mu\text{m}$ )                | 52% zračenja |



Slika 1. Spektar sunčeva zračenja [4]

### 2.1.1. Položaj sunca

Na slici 5 prikazani su kutovi koji definiraju međusobni položaj površine na zemlji i sunca, te kutovi koji definiraju položaj površine u odnosu na zemlju. Dužina OQ spaja lokaciju površine na zemlji sa suncem, SOJ je pravac sjever-jug, IOZ je pravac istok-zapad. OV je okomica na horizontalnu ravninu u kojoj se nalaze azimut sunca FI i azimut površine PSI. Orijentacija i položaj promatrane površine na zemlji u odnosu na sunce direktno utječe na iskoristivost sunčeva zračenja, [6].



Slika 2. Solarni kutovi za proizvoljno orijentirane površine [6]

### 2.1.2. Komponente Sunčeva zračenja koje dopire do zemlje

Sunčevo zračenje koje dopire do ruba Zemljine atmosfere naziva se ekstraterestičko zračenje.

Budući da se udaljenost Zemlje od Sunca mijenja tijekom godine, tako se mijenja i ekstraterestičko zračenje. Dio sunčeve energije koji dopire do zemljine atmosfere se reflektira nazad u svemir, dio se apsorbira u atmosferi, dok dio apsorbira zemljina površina.

Količina sunčevog zračenja koji dopire do određene lokacije na Zemlji određena je zemljopisnim koordinatama, godišnjim dobom, atmosferskim prilikama, oblikom površine i njenom refleksivnošću. Kombinacija refleksije, apsorpcije i raspršenja rezultira velikim zračenjem na većini lokacija na Zemlji. Sunčevo zračenje do zemlje dolazi u tri različita oblika kao direktno, difuzno i reflektirano zračenje, [5].

Direktno zračenje je onaj dio Sunčevog zračenja koji netaknut dopire pravocrtno od Sunca do Zemljine površine.

Difuzno zračenje do nas ne dolazi direktno, nego mu se na putu promjeni smjer ili spektralni sastav. Zbog difuznog zračenja nije potpuni mrak kad su na nebu oblaci.

Reflektirano zračenje je dio sunčeva zračenja koje se reflektira od površine vode, snijega ili oblaka. Izračun dozračenosti Sunčeve energije na površinu Zemlje zahtijeva poznavanje oblika i refleksivnosti površine [5].

Globalno (Totalno) zračenje mjereno na nekom području na Zemlji je ukupna količina zračenja koja pada na horizontalnu plohu. Predstavlja zbroj direktnog, difuznog i reflektiranog zračenja. Direktno zračenje čini glavnu komponentu globalnog zračenja, ima najveći energetske doprinos, [6].

$$I_{UK} = I_D + I_d + I_r \quad (2.1)$$

Insolacija ili dozračenost je trajanje obasjavanja suncem. Pojam se odnosi na gustoću sunčevih zraka na određenoj površini uz određenu orijentaciju, kroz određeno vrijeme. Mjeri se u Wh/m<sup>2</sup> ili kWh/m<sup>2</sup>. Energija sunčevog zračenja koja dopire do površine Zemlje ovisi o prvom redu o broju sunčanih sati, dok trajanje zračenja ovisi o geografskoj širini i o godišnjem dobu, [6]. U sklopu ovog rada promatra se utjecaj ljetovanja i posrtanja na iznos direktnog Sunčeva zračenja na površinu, dok se utjecaj gibanja na iznos difuznog i reflektiranog zračenja zanemaruje zbog već spomenute dominantnosti direktnog zračenja u ukupnom iznosu zračenja. Intenzitet Sunčevog zračenja tijekom vedrog dana na proizvoljno postavljenu plohu može se odrediti pomoću izraza:

$$I_D = I_{DN} \cdot \cos(\theta) \quad (2.2)$$

Gdje je  $I_{DN}$  intenzitet sunčevog zračenja na plohu postavljenu okomito na dolazeće sunčeve zrake i određuje se prema, [6]:

$$I_{DN} = \frac{A}{\exp\left(\frac{B}{\sin(\beta)}\right)} \quad (2.3)$$

Gdje su:

$A$  – sunčevo zračenje na granici atmosfere

$B$  – koeficijent atmosferskog prigušenja

Vrijednosti  $A$  i  $B$  se mijenjaju zbog promjena sadržaja vlage i prašine u atmosferi te promjena udaljenosti zemlje i sunca, [6].

### 3. POMORSTVENOST PLOVNIH OBJEKATA

Pomorstvenost plovnog objekta je znanstvena disciplina koja proučava odzive plovnih objekata na uzbuđu uzrokovanu valovima radi procjene njihove operativnosti i sigurnosti na nemirnom moru.

#### 3.1. Linearna teorija valova

Uzrok valnog gibanja vanjski su poremećaji koji djeluju na fluid. Valove je prema tipu uzročnih sila moguće podijeliti na, [1]:

- **Gravitacijske valove** koji nastaju djelovanjem vjetrova, gibanjem uronjenog tijela, potresa i sl.
- **Kapilarne valove** koji nastaju uslijed sila napetosti površine fluida, uzrokovani su djelovanjem vjetrova ili uronjenog tijela
- **Elastične valove** koji nastaju zbog stlačivosti fluida, primjerice zvučni valovi

U području pomorstvenosti naglasak je stavljen na gravitacijske valove dok su kapilarni valovi i elastični valovi zanemareni. Linearna teorija valova poznata kao teorija male amplitude smatra se najjednostavnijom teorijom dvodimenzijskog progresivnog površinskog vala. Najjednostavniji model koji objašnjava strujanje i sve pojave u valu je model harmonijskog progresivnog vala koji se još naziva i Airyevim valom. Model sadrži temeljne jednačbe strujanja i rubne uvjete teorije gravitacijskog vala, te pojednostavljenja koja vode razvoju linearne teorije. Ta je teorija nadalje primjenjena pri dobivanju kinematičkih i dinamičkih značajki dvodimenzijskog površinskog vala i omogućava razumijevanje fizikalnih svojstava i zakonitosti gibanja izdvojenog vala. Linearna teorija se radi svoje jednostavnosti mnogo lakše primjenjuje od teorije velikih amplituda, a daje prihvatljive rezultate.

##### 3.1.1. Osnove teorijske hidromehanike u teoriji vala

Dio teorijske hidromehanike koji tumači pojednostavljeni model vala i strujanja oko uronjenog dijela tijela koje se njiše na valovima, temelji se na nekolicini osnovnih pretpostavki i uključuje razumijevanje pojma potencijala brzine strujanja, jednačbe kontinuiteta, Eulerove jednačbe ravnoteže čestice tekućine, te Bernoullijeve jednačbe hidrodinamičkog tlaka.

### 3.1.1.1. Potencijal brzine strujanja

$$\text{rot } \mathbf{v} = \Delta \times \mathbf{v} = 0 \quad (3.1)$$

odnosno

$$\left( \frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \mathbf{i} + \left( \frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \mathbf{j} + \left( \frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \mathbf{k} = 0 \quad (3.2)$$

Gdje je:

$\mathbf{v}$  – vektor brzine strujanja fluida

$\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$  – jedinični vektori u smjeru osi  $x, y$ , i  $z$  redoslijedno

$v_x$  – komponenta brzine čestice fluida u smjeru osi  $x$

$v_y$  – komponenta brzine čestice fluida u smjeru osi  $y$

$v_z$  – komponenta brzine čestice fluida u smjeru osi  $z$

$$\begin{aligned} \mathbf{v}(x, y, z; t) &= \text{grad} \Phi(x, y, z; t) = \nabla \cdot \Phi(x, y, z; t) \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \Phi(x, y, z; t) \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \Phi(x, y, z; t) \mathbf{j} \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial z} \Phi(x, y, z; t) \mathbf{k} = v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j} + v_z \mathbf{k} \end{aligned} \quad (3.3)$$

### 3.1.1.2. Strujna funkcija

Strujnice su „linije koje prate strujanje“. Kod dvodimenzijanskog strujanja ( $v_z = 0$ ) količina tekućine između dvije strujnice koje prolaze točkom A, odnosno točkom B određuje se kao

$$d\Psi = \frac{d\Psi}{dy} \cdot dy - \frac{d\Psi}{dx} \cdot dx = v_x dy - v_y dx \quad (3.4)$$

uz odnos između funkcije potencijala brzine  $\Phi$  i strujne funkcije  $\Psi$  (Cauchy-Riemanov odnos).

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{\partial \Psi}{\partial y} \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial y} = -\frac{\partial \Psi}{\partial x} \quad (3.6)$$

Strujna se funkcija može definirati kao matematička funkcija za koju vrijedi

$$v_x = \frac{\partial \Psi}{\partial y} \quad (3.7)$$

$$v_y = -\frac{\partial \Psi}{\partial x} \quad (3.8)$$

### 3.1.1.3. Jednadžba kontinuiteta

Jednadžba kontinuiteta definira neprekidnost mase fluida, odnosno da u fluidu ne postoje neispunjeni prostori. Pod pretpostavkom da je idealna tekućina nestlačiva promjena protoka mora biti jednaka nuli. To znači da je količina tvari koja je ušla u sustav jednaka onoj količini koja je iz njega izašla. Jednadžba kontinuiteta slijedi iz sume protoka u sva tri smjera. Uz tu pretpostavku jednadžba kontinuiteta poprima oblik Laplaceove jednadžbe:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (3.9)$$

Ili

$$\nabla \cdot v = \Delta \Phi = 0 \quad (3.10)$$

#### 3.1.1.4. Eulerova jednadžba gibanja u neviskoznoj tekućini

Matematičar Leonhard Euler sredinom osamnaestog stoljeća prilagodio je Newtonov drugi zakon neviskoznim nestlačivim fluidima. Komponenta sile u smjeru osi  $x$  zbog djelovanja hidrodinamičkog tlaka  $p$  okomito na površinu  $dydz$  jednaka je umnošku mase diferencijalnog volumena i njezina ubrzanja u smjeru osi  $x$ .

$$\begin{aligned} dm \frac{Dv_x}{Dt} &= \rho \, dx \, dy \, dz \, \frac{Dv_x}{Dt} \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x} \, dx \, dy \, dz \end{aligned} \quad (3.11)$$

gdje je:

$\frac{D}{Dt}$  - materijalna derivacija

Eulerova jednadžba izražava ravnotežu sila na materijalnoj čestici tekućine koja se nalazi u gibanju u smjeru osi  $x$ ,  $y$  i  $z$ . U vektorskom obliku jednadžba glasi:

$$\nabla p = \rho \frac{Dv}{Dt} \quad (3.12)$$

Gdje je:

$p$  – hidrodinamički tlak

$\frac{Dv}{Dt}$  – materijalna ili supstancijalna derivacija

#### 3.1.1.5. Bernoullijeva jednadžba

Bernoullijeva jednadžba predstavlja zakon očuvanja energije strujanja po jedinici mase fluida i te glasi:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} v^2 + \frac{p}{\rho} + gz = \text{const.} \quad 3.13$$

Gdje je:

$g$  – ubrzanje zemljine gravitacijske sile

$z$  – geodetska visina

### 3.1.2. Harmonijski ravninski valovi

Naziv harmonijski valovi odnosi se na periodično ponavljanje valnih obilježja u vremenu i prostoru. Ako je oblik valnog gibanja jednak u ravninama paralelnih presjeka, valovi se nazivaju i ravninskima, [1].

Ishodište koordinatnog sustava promatranog harmonijskog vala smješteno je na mirnu slobodnu površinu, os  $x$  usmjerena je u smjeru gibanja vala, a os  $z$  usmjerena je okomito na mirnu slobodnu površinu tako da joj je pozitivan smjer prema gore. Dubina vode mjeri se od morskog dna do mirne slobodne površine.

Profil vala definiran je pomoću ovih karakterističnih veličina:

- **valna visina**  $H$  je udaljenost od valnog brijega do valnog dola. Kod valova opisanih harmonijskim funkcijama vrijedi:

$$H = 2\zeta_a \quad (3.14)$$

gdje je:

$\zeta_a$  – valna amplituda (udaljenost od vrha valnog brijega do slobodne površine)

- **valna duljina**  $\lambda$  je horizontalna udaljenost između dva susjedna dola ili brijega
- **valni period**  $T$  je vremenski razmak između nailaska dva uzastopna dola ili brijega
- **valna strmina**  $H/\lambda$  računa se kao omjer visine vala i valne duljine, što je val kraći i viši to je i strmiji

Značajke harmonijskog vala mogu se izraziti pomoću kutnih vrijednosti, koje se dobiju pomoću valne duljine i perioda.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (3.15)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.16)$$

gdje je:

$k$  – valni broj (rad/m)

$\omega$  – kružna valna frekvencija (rad/s)

### 3.1.3. Potencijalna teorija

Da bi strujanje bilo potencijalno ono mora biti neviskozno, nestlačivo i homogeno. Pretpostavlja se da u fluidu nema kavitacijskih mjehurića plina tako da za takvo strujanje vrijede pojednostavljeni zakoni mehanike fluida. Potencijalna teorija ima svoja ograničenja, ali u najgorem slučaju daje barem kvalitativnu sliku pojedinog strujanja. Da bi teoriju potencijalnog strujanja mogli koristiti u opisu značajki valova potrebno je pretpostaviti malu valnu strminu što znači da je teorija ograničena na valove malih valnih visina.

#### 3.1.3.1 Rubni uvjeti

Izraz za potencijal brzine strujanja u valu je harmonijska funkcija koja se može prikazati u obliku:

$$\Phi_{w(x,z,t)} = P(z) \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (3.17)$$

Kako bi dobili izraz za potencijal brzine ovisan o značajkama vala moramo zadovoljiti četiri rubna uvijeta:

1. Uvjet kontinuiteta prema kojem je divergencija vektora brzine u bilo kojoj točki fluida jednaka nuli. Uvrštavanjem komponenti brzine u taj izraz dobiva se Laplaceova jednadžba:

$$\nabla^2 \Phi_w = \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial z^2} = 0 \quad (3.18)$$

Gdje je:

$\Phi_w$  – potencijal brzine strujanja vala

2. Uvjet nepromočivosti morskog dna koji određuje da je vertikalna komponenta brzine strujanja čestice fluida na dnu jednaka nuli:

$$w = v_z = \frac{\partial \Phi_w}{\partial z} = 0, \text{ za } z = -d \quad (3.19)$$

3. Dinamički rubni uvjet na slobodnoj površini koji vrijedi na valovitoj slobodnoj površini i određuje da je tlak na slobodnoj površini jednak atmosferskom tlaku:

$$\frac{\partial \Phi_w}{\partial t} + g\zeta = 0, \quad \text{za } z = \zeta \quad (3.20)$$

gdje je:

$\zeta$  - elevacija (položaj) vala

4. Kinematički rubni uvjet na slobodnoj površini koji određuje da je vertikalna komponenta brzine čestice fluida na slobodnoj površini jednaka vertikalnoj brzini slobodne površine:

$$\frac{d\Phi_w}{dz} = \frac{\partial \zeta}{\partial t}, \quad \text{za } z = \zeta \quad (3.21)$$

Ukoliko se zadovolji Laplaceova jednadžba i navedeni rubni uvjeti moguće je izraziti potencijal brzine strujanja valova u vodi ograničene dubine:

$$\Phi_w(x, y, t) = \frac{\zeta_a g \cdot \cosh k(d + z)}{\omega \cdot \cosh kd} \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (3.22)$$

Dok za duboku vodu izraz poprima oblik:

$$\Phi_w(x, y, t) = \frac{\zeta_a g}{\omega} \cdot e^{kz} \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (3.23)$$

gdje je:

$\zeta_a$  - valna amplituda

$\omega$  - valna frekvencija

$k$  - valni broj

$d$  - dubina vode

### 3.2. Morski valovi

Morske valove moguće je prikazati kao sumu harmonijskih valova različitih značajki. Kod morskih valova značajke je primjerenije definirati pomoću srednjih vrijednosti npr. srednja valna amplituda, srednja valna duljina, srednji valni period itd.

### 3.2.1 Spektri energije morskih valova

Relativna važnost pojedinih harmonijskih komponenti u morskom valu može biti prikazana spektrom gustoće energije valova. Spektar energije za svaku pojedinu harmonijsku komponentu definiran je tako da je površina u jednom frekvencijskom intervalu proporcionalna totalnoj energiji za jediničnu površinu svih valnih komponenti sadržanih u tom intervalu, [1].

### 3.2.2 Teorijski spektri energije

Spektri gustoće energije valova, dobiveni iz zapisa morskih valova na određenom mjestu i tijekom određenog vremenskog vremena predstavlja jedinstveni i neponovljivi eksperimentalni rezultat pa im je primjena ograničena. Zato se koriste idealni spektri koji su definirani teorijskim formulama. Neki od popularnijih teorijskih spektara su, [1]:

- Bretschneiderov spektar
- Pierson – Moskowitz spektar
- JONSWAP spektar
- ITTC valni spektar
- Tabainov spektar za Jadransko more

JONSWAP spektar (Joint North Sea Wave Project) izražen je u obliku:

$$S_{\zeta}^J(\omega) = 0.658 S_{\zeta}^B(\omega) \gamma^{\exp\left(-\frac{(\omega-\omega_m)^2}{2\sigma^2\omega_m^2}\right)} \quad (3.24)$$

gdje je:

$S_{\zeta}^B$  – Bretschneiderov spektar

$\omega_m$  – modalna frekvencija

$\sigma$  – širina krivulje

$\gamma$  – Parametar odnosa (3,3 srednja vrijednost za jadransko more)

Izraz za Bretschneiderov spektar glasi:

$$S_{\zeta}^B(\omega) = \frac{A}{\omega^5} e^{-\frac{B}{\omega^4}} \quad (3.25)$$

gdje su  $A$  i  $B$  konstante pojedinog spektra koje ovise o parametrima spektra.

### 3.3. Model njihanja broda

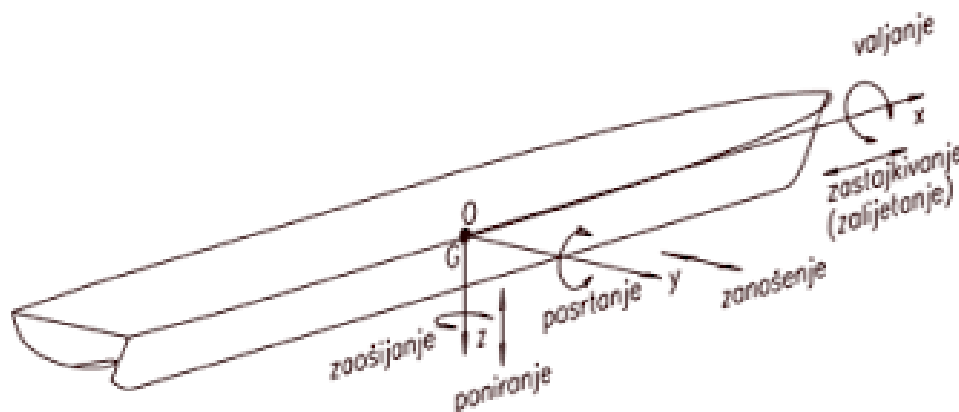
Nailaskom harmonijskog progresivnog vala na uronjeno tijelo, val predaje dio svoje energije tijelu koje se počinje oscilacijski gibati odnosno počinje emitirati energiju koja se radijalno širi u svim horizontalnim smjerovima. Gubitak energije vala prilikom predaje energije tijelu očituje se na smanjenju njegove visine, dok duljina vala odnosno period i frekvencija ostaju nepromijenjeni, [1]. Oscilirajuće gibanje tijela sastoji se od tri translacijske komponente u smjeru osi  $x$ ,  $y$ ,  $z$  i tri rotacijske komponente oko osi  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Translacijske komponente su:

- **zalijetanje** u smjeru osi  $x$
- **zanošenje** u smjeru osi  $y$
- **poniranje** u smjeru osi  $z$

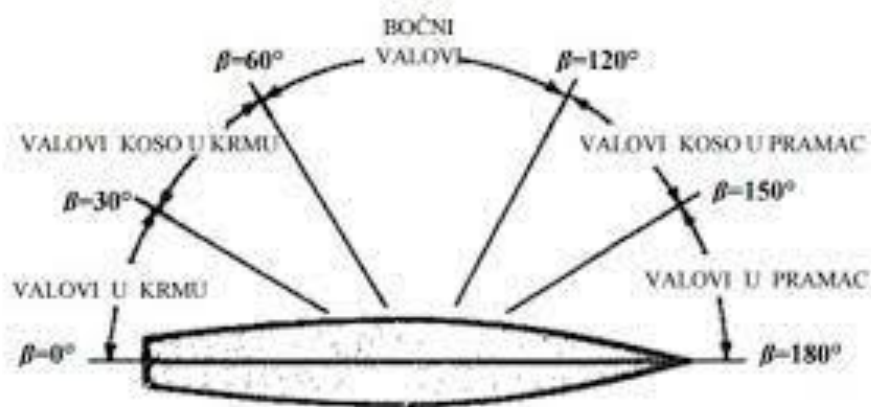
Rotacijske komponente su:

- **ljuljanje** oko osi  $x$
- **posrtanje** oko osi  $y$
- **zaošijanje** oko osi  $z$



Slika 3. Oblici njihanja na harmonijskim valovima [3]

Susretni kut  $\beta$  definira se kao kut koji zatvaraju vektor brzine broda i vektor brzine vala.



Slika 4. Kutovi nailaska vala na brod [3]

### 3.3.1. Dinamička ravnoteža njihanja

Jednadžbe gibanja tijela u šest stupnjeva slobode proizlaze iz drugog Newtonovog zakona gibanja. Sile koje djeluju na tijelo jednake su umnošku mase i ubrzanja dok su momenti koji djeluju na tijelo jednaki umnošku momenta tromosti i kutnog ubrzanja. Tijelo koje se giba na valu je u svakom trenutku u stanju dinamičke ravnoteže. Dinamička ravnoteža gibanja izražena je sljedećim sustavom diferencijalnih jednadžbi koji izražava ravnotežu inercijskih, hidromehaničkih i uzbudnih sila, [3]:

$$([M_{jk}] + [A_{jk}])\{\ddot{\eta}_j\} + [B_{jk}]\{\dot{\eta}_j\} + [C_{jk}]\{\eta_j\} = \zeta_a\{F_j(t)\} \quad (3.26)$$

$$= \text{Re}\{\zeta_a\{F_j\}e^{i\omega t}\}$$

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

$$([C_{jk}] - \omega^2([M_{jk}] + [A_{jk}]) + i\omega[B_{jk}])\{\delta_j\}e^{i\omega t} = \zeta_a\{F_j\}e^{i\omega t} \quad (3.27)$$

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

$$([C_{jk}] - \omega^2([M_{jk}] + [A_{jk}]) + i\omega[B_{jk}])\{\delta_j\} = \zeta_a\{F_j\} \quad (3.28)$$

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

$[A_{jk}]$  - matrica pridruženih masa

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

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

$\{\ddot{\eta}_j\}$  - vektor ubrzanja

$\{\dot{\eta}_j\}$  - vektor brzina

$\{\eta_j\}$  - vektor pomaka

$\{F_j(t)\}$  - vektor uzbudnih sila u ovisnosti o vremenu

$\{\delta_j\}$  - vektor kompleksnih amplituda pomaka

### 3.3.1.1. Matrica mase tijela

Za određivanje matrice mase  $[M_{jk}]$  potrebno je poznavati masu tijela i vertikalni položaj mase te odrediti momente tromosti mase tijela oko koordinatnih osi. Matrica mase tijela sa šest stupnjeva slobode glasi:

$$[M_{jk}] = \begin{bmatrix} M & 0 & 0 & 0 & M_{Zg} & 0 \\ 0 & M & 0 & -M_{Zg} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -M_{Zg} & 0 & I_{44} & 0 & -I_{46} \\ M_{Zg} & 0 & 0 & 0 & I_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -I_{46} & 0 & I_{66} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Gdje su:

$M$  – masa tijela

$I_{jj}$  – momenti tromosti mase oko j-tih osi

$I_{jk}$  – centrifugalni moment mase

Javlja se samo jedan centrifugalni moment mase zbog pretpostavke uzdužne simetrije tijela. Ostali elementi matrice koji se ne nalaze na dijagonali jednaki su nuli ako se ishodište koordinatnog sustava poklapa s težištem tijela.

### 3.3.1.2. Matrica pridruženih masa i matrica hidrodinamičkog prigušenja

Naziv pridružene mase odnosi se na postojanje dodatne sile koje je potrebna da ubrza okolnu vodu zbog čega se razmatrano tijelo ponaša kao da ima pridruženu masu. Matrica pridruženih masa  $[A_{jk}]$  i matrica pridruženog hidrodinamičkog prigušenja  $[B_{jk}]$  sastoje se od članova određenih pomoću neke od teorija potencijalnog strujanja.

### 3.3.1.3. Matrica krutosti povratnih hidrostatskih sila

Povratna sila i moment koji djeluju na tijelo koje se njiše u tekućini slijede iz integracije hidrostatske komponente u Bernoullijevoj jednadžbi. Kod tijela koja su simetrična u odnosu na vertikalnu ravninu, integracija većeg broja elemenata matrice po oplakanoj površini  $S$  zbog simetričnosti je jednaka nula, pa rezultirajuća matrica krutosti povratnih sila glasi:

$$[C_{jk}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{33} & 0 & C_{35} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{53} & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Gdje su:

$$C_{33} = \rho g A_{wl} \quad (3.31)$$

$$C_{35} = C_{53} = -\rho g M_{wl} \quad (3.32)$$

$$C_{44} = M g \overline{GM} \quad (3.33)$$

$$C_{55} = \rho g I_{wl} \quad (3.34)$$

$A_{wl}$ - površina vodne linije

$M_{wl}$ - statički moment površine vodne linije

$I_{wl}$ - moment inercije površine vodne linije

$\overline{GM}$ - metacentarska visina

### 3.3.1.4. Pomaci, brzine i ubrzanja

Oscilacijsko gibanje tijela opisan je zakonom koji se može prikazati i u kompleksnom obliku:

$$\begin{aligned}\eta_j(t) &= \operatorname{Re}\{\delta_j e^{-i\omega_e t}\} = \eta_{Cj} \cos \omega_e t + \eta_{Sj} \sin \omega_e t \\ &= \eta_{aj} \cos(\omega_e t + \varepsilon_j), \quad j = 1 \dots 6\end{aligned}\quad (3.35)$$

Gdje su:

$\delta_j$ - kompleksne amplitude njihanja

$\omega_e$ - kružna frekvencija harmonijskog njihanja

$\eta_{aj}$ - realna vrijednost amplitude njihanja

$\varepsilon_j$ - fazni pomak u odnosu na val

Brzina se dobije kao prva derivacija pomaka po vremenu:

$$\begin{aligned}\dot{\eta}_j(t) &= \frac{\partial}{\partial t} \eta_j(t) = \operatorname{Re}\{-i\omega_e \delta_j e^{-i\omega_e t}\} = -\omega_e \sin(\omega_e t + \varepsilon_j) = \\ &= \omega_e \eta_{aj} \cos\left(\omega_e t + \varepsilon_j + \frac{\pi}{2}\right), \quad j = 1 \dots 6\end{aligned}\quad (3.36)$$

ubrzanje se dobije kao derivacija brzine po vremenu:

$$\begin{aligned}\ddot{\eta}_j(t) &= \frac{\partial^2}{\partial t^2} \eta_j(t) = \operatorname{Re}\{-\omega_e^2 \delta_j e^{-i\omega_e t}\} = -\omega_e^2 \eta_{aj} \cos(\omega_e t + \varepsilon_j) = \\ &= \omega_e^2 \eta_{aj} \cos(\omega_e t + \varepsilon_j + \pi), \quad j = 1 \dots 6\end{aligned}\quad (3.37)$$

### 3.3.1.5. Inercijske sile i momenti

U linearnoj teoriji ukupne sile, odnosno momente koji djeluju na tijelo prikazujemo kao sumu uzbudne sile  $F_j$  i hidromehaničke sile  $F_{Hj}$  ovisno o vremenu:

$$F_{\eta j}(t) = F_j(t) + F_{Hj}(t) \quad (3.38)$$

Uzbudne se sile dobiju rješenjem problema djelovanja valova na nepomično tijelo.

Hidrodinamičke sile određujemo rješenjem problema njihanja tijela na mirnoj slobodnoj površini. Koristeći matričnu notaciju, inercijske sile i momente oko koordinatnih osi izražavamo kao:

$$\{F_j\} = [M_{kj}] \{\ddot{\eta}_j\} = \operatorname{Re}\{-\omega^2 [M_{kj}] \{\delta_j\} e^{-i\omega t}\} \quad (3.39)$$

### 3.3.2. *Jednadžba dinamičke ravnoteže njihanja devet susjednih plutajućih tijela*

U odnosu na slučaj s jednim plutajućim tijelom, slučaj s devet tijela je mnogo složeniji jer sadrži 54 stupnja slobode gibanja (jer se razmatra 9 tijela sa 6 stupnjeva slobode gibanja). Hidrodinamički koeficijenti kao što su dodatna masa, hidrodinamičko prigušenje te sila difrakcije valova moraju u obzir uzeti međudjelovanje svih devet tijela. Jednadžbe gibanja dobivaju se određivanjem nepoznanica  $54 \times 54$  sustava jednadžbi.

### 3.3.3. *Prijenosne funkcije*

Najpogodniji način prikazivanja odziva plovnog objekta na harmonijskim valovima različitih frekvencija je prijenosna funkcija  $H_{Ra}$ , odnosno operator amplitude odziva RAO koji pokazuje omjer amplitude odziva  $R_a$  i amplitude vala  $\zeta_a$ .

$$RAO = |R_a/\zeta_a| = H_{Ra}^2 \quad (3.40)$$

### 3.4. **Odziv broda na morskim valovima**

Osnova za određivanje odziva je prijenosna funkcija tog odziva.  $S_R(\omega_e)$  je funkcija spektra odziva. Prijenosna funkcija je ovisna o susretnoj frekvenciji, a određuje se za zadanu brzinu i kurs broda. Njezina vrijednost predstavlja amplitudu odziva broda koji se kreće valovima jedinične amplitude i zadane duljine, odnosno frekvencije. Površina ispod spektra odziva dobije se kao nulti moment spektra.

$$m_{0R} = \int_0^\infty S_R(\omega_e) \cdot d\omega_e \quad (3.41)$$

## 4. PRORAČUN INSOLACIJE IZLOŽENE POVRŠINE PLUTAJUĆEG TIJELA

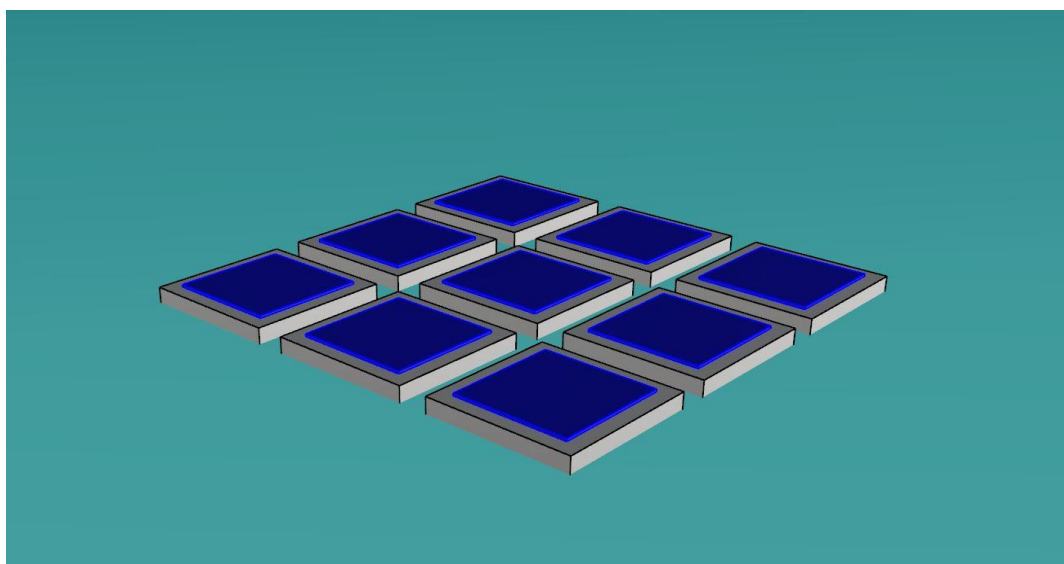
### 4.1. Opis programskog paketa HydroStar

Hydrostar (Bureau Veritas) je programski paket koji se temelji na linearnoj teoriji potencijalnog strujanja te na panelnoj metodi. Kao takav omogućuje izračun difrakcijske i radijacijske komponente potencijala brzine, interakciju broda i valova te međudjelovanje više tijela.

### 4.2. Priprema podataka za HydroStar

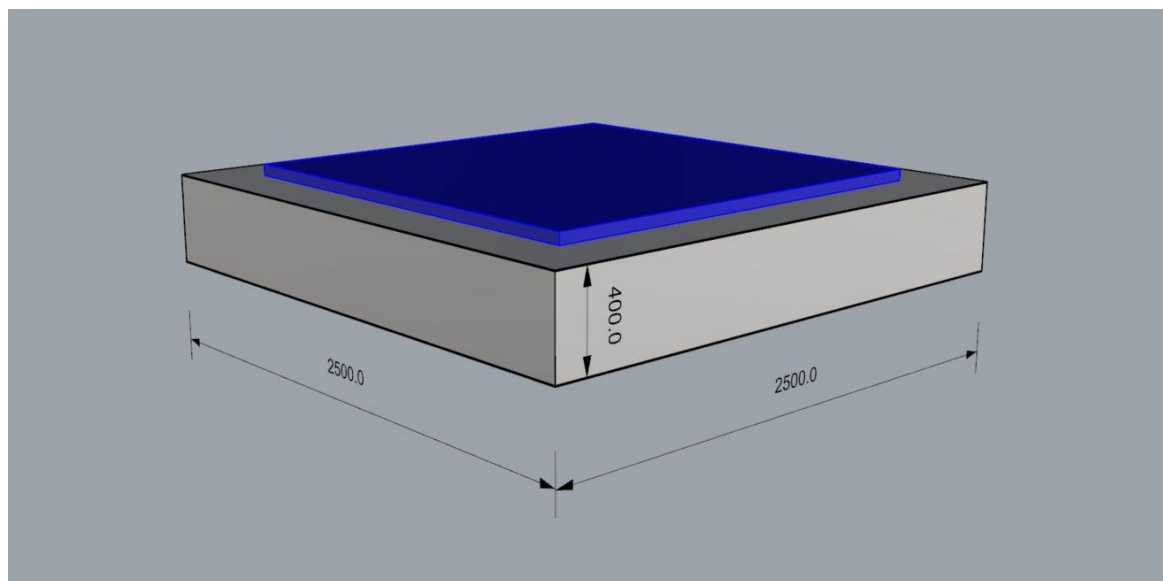
Odziv pontona promatrao se za dvije značajne valne visine  $H_{1/3} = 1.5$  m i  $H_{1/3} = 2.5$  m za svih 6 stupnjeva slobode. Na pontone su nailazili pravilni valovi pod kutom od 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 stupnjeva. Pontoni su u razmatranom slučaju povezani te imaju značajno smanjene vrijednosti translatornih pomaka u horizontalnoj ravnini i zaošijanja, stoga su za procjenu izloženosti površine Sunčevom zračenju u obzir uzeta samo rotacijska gibanja tj. ljuljanje i posrtanje.

Prvi korak prije ulaska u proračun radijacije i difrakcije je generiranje čvorova odnosno mreže. Da bi se generirala mreža potrebno je znati koordinate točaka na kojima se nalaze čvorovi. Na slici 5. je prikazan raspored pontona u moru.



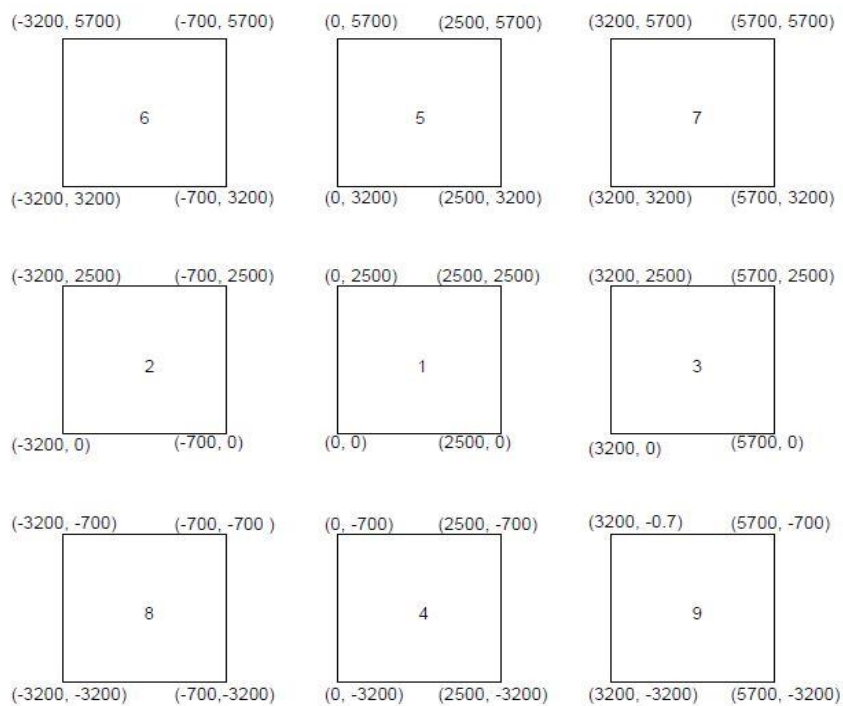
Slika 5. Prikaz pontona sa solarnim panelima na palubi

Na slici 6. prikazane su dimenzije pontona u milimetrima.



Slika 6. Prikaz glavnih dimenzija

Na slici 7. prikazane su koordinate (x,y) rubova pontona u kojima se definiraju čvorovi. Koordinate su prikazane u milimetrima. U središtu pontona nalaze se identifikacijski brojevi pontona. Razmak između pontona je konstantan i iznosi 700 mm.



Slika 7. Raspored pontona i koordinate rubnih točaka

Čvorovi pontona na gornjoj i donjoj plohi odnosno na dnu i palubi imaju iste koordinate  $x$  i  $y$  dok su ovisno radi li se o gornjoj ili donjoj plohi koordinate  $z$  različite. Izabrano je da ishodište koordinatnog sustava bude u točki  $(x,y,z) = (0,0,0)$  tako da pri modeliranju paluba ima pozitivnu koordinatu  $z$  (za palubu 400 mm). Međutim u programskom paketu HydroStar modelira se samo uronjeni dio forme, dok se dio iznad vode zanemaruje jer ne utječe na strujanje. Pošto je određeno da je vodna linija na visini 130 mm, koordinate  $(x,y)$  dna biti će iste kao na slici dok je koordinata  $z = 0$ . U ravnini vodne linije koordinate  $(x,y)$  također su iste kao na slici dok je koordinata  $z = 130\text{mm}$ .

HydroStar u slučaju problema gibanja više tijela ne može modelirati mrežu s uvjetom simetrije već se mora modelirati svako tijelo zasebno. Na slici 8. je prikazano kako izgleda datoteka u kojoj su definirani čvorovi za ponton 1.

```
File Edit Format View Help
TYPE 1

SYMMETRY 0
NBBODY 9

NODE 1 0.000 0.000 0.000
NODE 2 2.500 0.000 0.000
NODE 3 2.500 2.500 0.000
NODE 4 0.000 2.500 0.000

NODE 5 0.000 0.000 0.130
NODE 6 2.500 0.000 0.130
NODE 7 2.500 2.500 0.130
NODE 8 0.000 2.500 0.130
```

Slika 8. Prikaz načina upisivanja koordinata čvorova

Nakon što su definirani čvorovi za svih devet tijela potrebno je definirati panele. Za definiciju panela potrebno je imati tri čvora (trokutni panel) ili četiri čvora (četverokutni panel) između kojih će se nalaziti mreža panela. Također je potrebno odrediti na koji će se način paneli generirati.

Primjer generiranja panela prikazan je na slici 9.

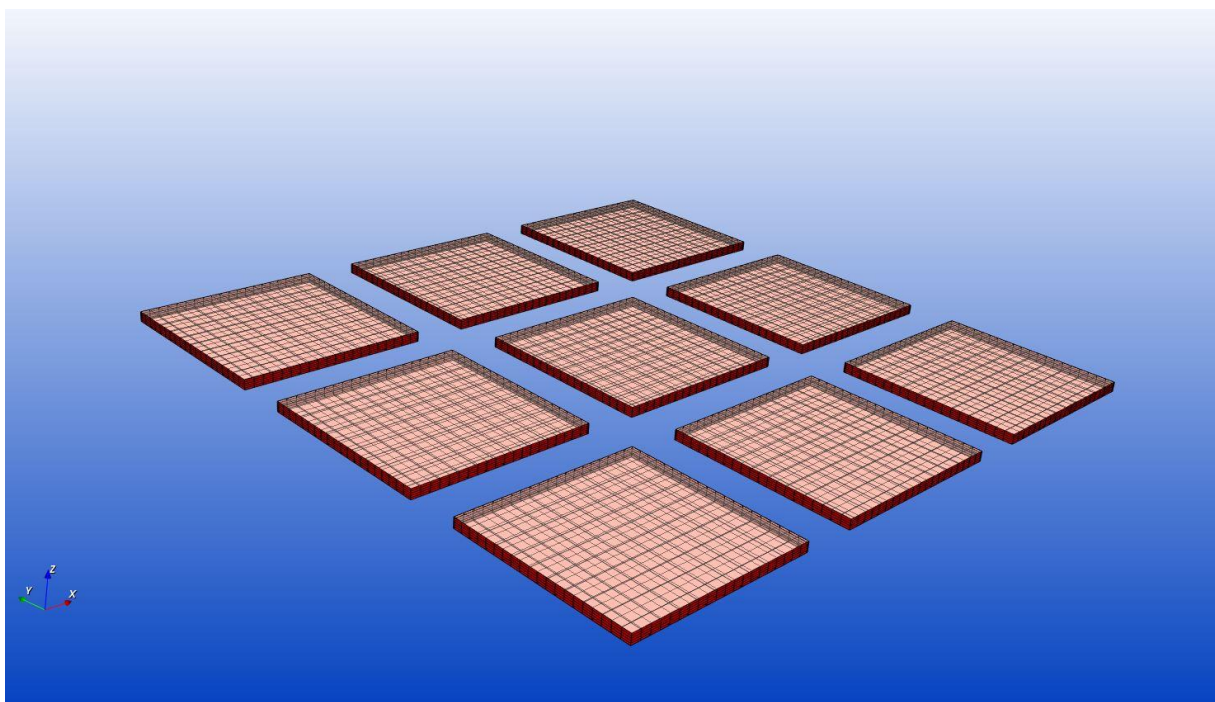
```
PATCH 1 NODE 4 3 2 1 AB_NB 10 AB_RULE 0 BC_NB 10 BC_RULE 0
PATCH 2 NODE 1 2 6 5 AB_NB 20 AB_RULE 0 BC_NB 5 BC_RULE 0
PATCH 3 NODE 2 3 7 6 AB_NB 20 AB_RULE 0 BC_NB 5 BC_RULE 0
PATCH 4 NODE 3 4 8 7 AB_NB 20 AB_RULE 0 BC_NB 5 BC_RULE 0
PATCH 5 NODE 4 1 5 8 AB_NB 20 AB_RULE 0 BC_NB 5 BC_RULE 0
```

Slika 9. Prikaz načina definiranja panela

U ovom slučaju definirani su paneli za tijelo 1 koje se sastoji od 5 ploha koje su podjeljene na 100 panela što ukupno daje 500 panela po tijelu odnosno 4500 panela za devet tijela. Nakon što je datoteka u kojoj su definirane koordinate čvorova i paneli kompletna, generirana je mreža u HydroStaru pozivanjem naredbe:

*hsmsh nazivdatoteke.msh*

Na slici 10. je pomoću modula hvview prikazana generirana mreža 9 tijela s panelima.



### 4.3. Proračun difrakcije i radijacije

Nakon generiranja mreže potrebno je napraviti datoteku *nazivdatoteke.rdf* u kojoj se definiraju frekvencije nailaznih valova, kutovi nailaska vala, dubina vode i brzina tijela. Ova datoteka je potrebna za ulaz u proračun dodatne mase, radijacije, difrakcije i opterećenja prvog reda. Na slici je prikazan primjer ulazne datoteke koja je korištena u ovom zadatku.

```
File Edit Format View Help
FILENAME B1

FREQUENCES TYPE 2
      WMIN 0.025
      WMAX 5.5
      WSTP 0.025
ENDFREQUENCES

HEADING TYPE 1
      0 10 20 30 40 50 60 70 80 90
ENDHEADING

SPEEDS TYPE 0
1      0
ENDSPEEDS

WATERDEPTH INF

ELIMIRREG YES

ENDFILE
```

Slika 10. Prikaz .rdf datoteke

Proračun se pokreće u programu HydroStar pomoću naredbe:

*hsrdf nazivdatoteke.rdf*

### 4.4. Proračun gibanja

Za ulaz u proračun gibanja potrebno je napraviti ulaznu datoteku *nazivdatoteke.mcn* u kojoj je potrebno definirati masu tijela, položaj težišta, matricu inercije i dodatne matrice prigušenja i krutosti ukoliko je potrebno. Na slici je prikazan primjer ulazne datoteke.

```

File Edit Format View Help
FILENAME B1

MASS_BODY      1      832.8125
MASS_BODY      2      832.8125
MASS_BODY      3      832.8125
MASS_BODY      4      832.8125
MASS_BODY      5      832.8125
MASS_BODY      6      832.8125
MASS_BODY      7      832.8125
MASS_BODY      8      832.8125
MASS_BODY      9      832.8125

GYRADIUS_BODY  1      0.8197  0.8197  1.1308
GYRADIUS_BODY  2      0.8197  0.8197  1.1308
GYRADIUS_BODY  3      0.8197  0.8197  1.1308
GYRADIUS_BODY  4      0.8197  0.8197  1.1308
GYRADIUS_BODY  5      0.8197  0.8197  1.1308
GYRADIUS_BODY  6      0.8197  0.8197  1.1308
GYRADIUS_BODY  7      0.8197  0.8197  1.1308
GYRADIUS_BODY  8      0.8197  0.8197  1.1308
GYRADIUS_BODY  9      0.8197  0.8197  1.1308

COGPOINT_BODY  1      1.250   1.250   0.200
COGPOINT_BODY  2     -1.950   1.250   0.200
COGPOINT_BODY  3      4.450   1.250   0.200
COGPOINT_BODY  4      1.250  -1.950   0.200
COGPOINT_BODY  5      1.250   4.450   0.200
COGPOINT_BODY  6     -1.950   4.450   0.200
COGPOINT_BODY  7      4.450   4.450   0.200
COGPOINT_BODY  8     -1.950  -1.950   0.200
COGPOINT_BODY  9      4.450  -1.950   0.200

REFPOINT_BODY  1      1.250   1.250   0.200
REFPOINT_BODY  2     -1.950   1.250   0.200
REFPOINT_BODY  3      4.450   1.250   0.200
REFPOINT_BODY  4      1.250  -1.950   0.200
REFPOINT_BODY  5      1.250   4.450   0.200
REFPOINT_BODY  6     -1.950   4.450   0.200
REFPOINT_BODY  7      4.450   4.450   0.200
REFPOINT_BODY  8     -1.950  -1.950   0.200
REFPOINT_BODY  9      4.450  -1.950   0.200

```

Slika 11. Prikaz .mcn datoteke

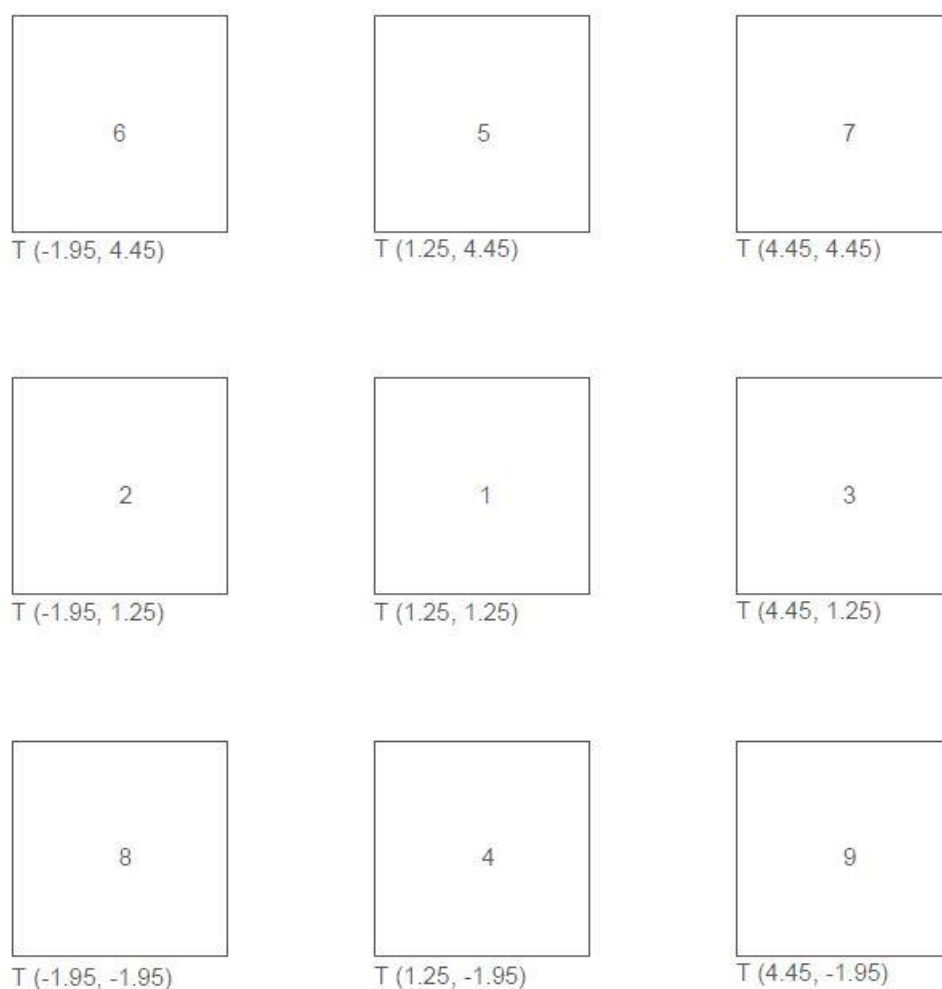
GYRADIUS\_BODY je naredba za definiranje radijusa tromosti tijela oko osi x, y i z.

Radijus tromosti tijela računa se po formuli:

$$r = \sqrt{\frac{I}{m}} \quad (4.1)$$

Gdje je  $I$  moment tromosti tijela oko odabrane osi, a  $m$  masa tijela.

Naredba `COGPOINT_BODY` definira položaj težišta određenog tijela. Težište tijela nalazi se u sredini volumena tijela. Na slici 12. su prikazane koordinate težišta u metrima za svako tijelo.

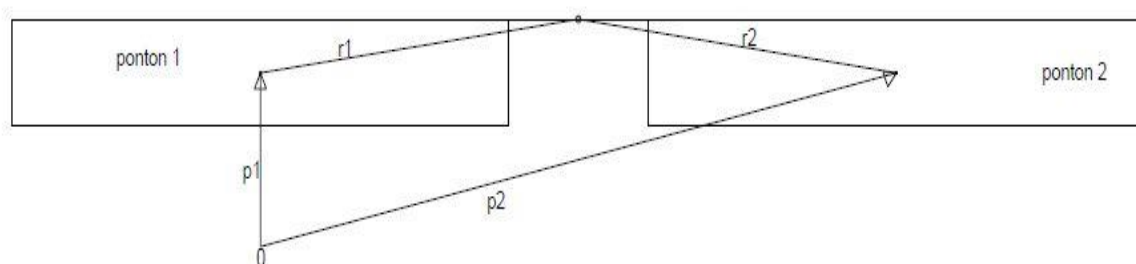


Slika 12. Prikaz pontona i koordinata njihovih težišta

`REFPOINT_BODY` naredbom postavljeno je da se referentna točka za tijelo nalazi u težištu volumena. Naredbom `hsmcn nazivdatoteke.mec` pokreće se proračun gibanja tijela.

#### 4.4.1. Spoj između pontona

Pontoni su u početnom položaju u statičkoj ravnoteži jer nema djelovanja valova, [2]



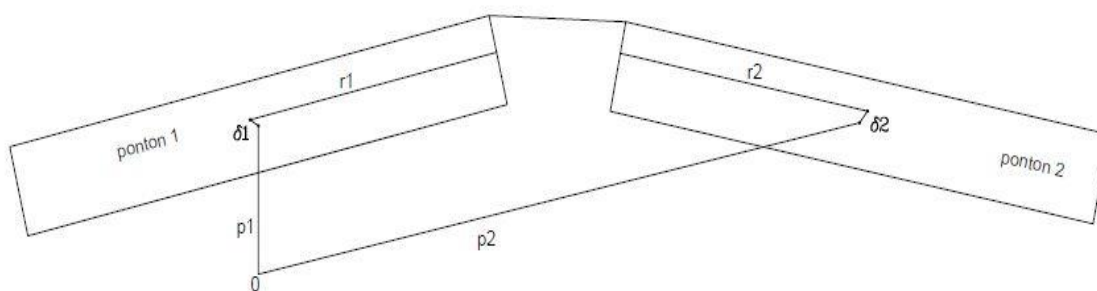
Slika 13. Prikaz pontona u ravnotežnom položaju

Na osnovu slike 13. vrijedi:

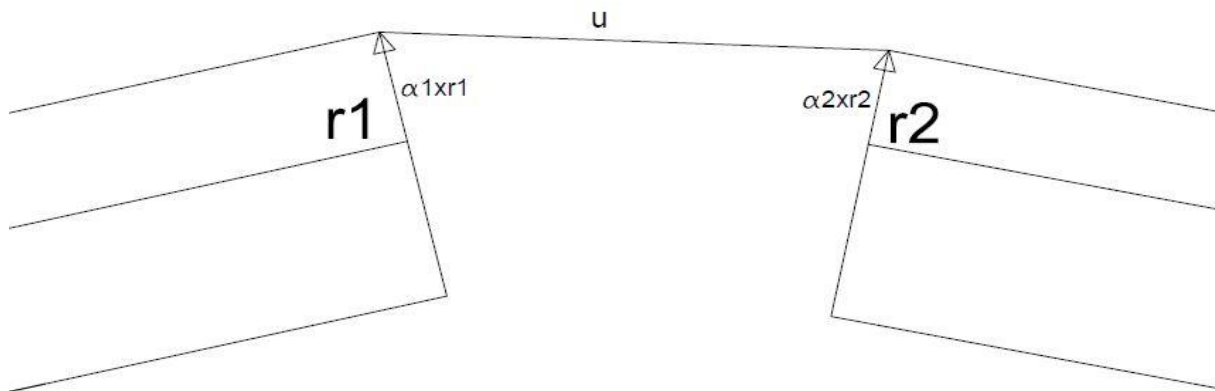
$$\vec{p}_1 + \vec{r}_1 = \vec{p}_2 + \vec{r}_2 \quad (4.2)$$

gdje su  $\vec{p}_1$ ,  $\vec{r}_1$ ,  $\vec{p}_2$ ,  $\vec{r}_2$  vektori konstantni u vremenu te su to vektori pozicije referentne točke od ishodišta koordinatnog sustava do točke spoja.

Na slici 14. prikazani su pontoni u vremenskom trenutku  $t$  kada počinje djelovanje valova



Slika 14. Prikaz pontona u nekom vremenskom trenutku  $t$



Slika 15. Prikaz pomaka razmatranih pontona

$\vec{u}$  – vektor relativne udaljenosti između točaka na kojima se ostvaruje spoj

$\vec{\delta}$  – translatorni pomaci

$\vec{\alpha}$  – kutni pomaci

Na osnovu slika 14. i 15. vrijedi:

$$\vec{p}_1 + \vec{r}_1 + \vec{\delta}_1 + \vec{\alpha}_1 \times \vec{r}_1 + \vec{u} = \vec{p}_2 + \vec{r}_2 + \vec{\delta}_2 + \vec{\alpha}_2 \times \vec{r}_2 \quad (4.3)$$

uz izraz (4.2)

$$\vec{p}_1 + \vec{r}_1 = \vec{p}_2 + \vec{r}_2$$

Dobivamo

$$\vec{\delta}_1 + \vec{\alpha}_1 \times \vec{r}_1 + \vec{u} = \vec{\delta}_2 + \vec{\alpha}_2 \times \vec{r}_2 \quad (4.4)$$

pa slijedi

$$\vec{u} = \vec{\delta}_2 - \vec{\delta}_1 + \vec{\alpha}_2 \times \vec{r}_2 - \vec{\alpha}_1 \times \vec{r}_1 \quad (4.5)$$

**Određivanje sile  $\vec{F}_1$** 

Sila  $\vec{F}_1$  je sila koja djeluje na ponton 1 i računa se prema:

$$\vec{F}_1 = k\vec{u} \quad (4.6)$$

**Određivanje sile  $\vec{F}_2$** 

Sila  $\vec{F}_2$  je sila koja djeluje na ponton 2 i računa se prema:

$$\vec{F}_2 = -k\vec{u} \quad (4.7)$$

gdje je  $k$  krutost spoja.

Sila  $\vec{F}_2$  suprotnog je smjera od  $\vec{u}$

Moment  $M_1$  oko referentne točke 0

$$\vec{M}_1 = (\vec{r}_1 + \vec{\delta}_1 + \vec{\alpha}_1 \times \vec{r}_1) \times \vec{F}_1 \quad (4.8)$$

Uvrštavanjem izraza (4.6) dobivamo

$$\vec{M}_1 = (\vec{r}_1 + \vec{\delta}_1 + \vec{\alpha}_1 \times \vec{r}_1) \times k\vec{u} \quad (4.9)$$

iz čega slijedi

$$\vec{M}_1 = (\vec{r}_1) \times k\vec{u} \quad (4.10)$$

$$\vec{M}_2 = -(\vec{r}_2) \times k\vec{u} \quad (4.11)$$

**4.4.1.1 Određivanje matrice krutosti spoja**

Na osnovu prikazanih izraza za sile i momente izvedena je matrica krutosti za spoj između pontona:

$$[Ks] = \begin{bmatrix} k & k \dots x r_1 & -k & -k \dots x r_2 \\ r_1 x k & r_1 x k (\dots x r_1) & -r_1 x k & -r_1 x k (\dots x r_2) \\ -k & -k \dots x r_1 & k & k \dots x r_2 \\ -r_2 x k \dots & -r_2 x k (\dots x r_1) & r_2 x k & r_2 x k (\dots x r_2) \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Navedeni izrazi odnose se na spoj između pontona 1 i pontona 2, ali analogno ovom izrazu mogu se izvesti iznosi za spoj drugih pontona.

#### 4.5. Prijenosne funkcije

Nakon svih potrebnih proračuna potrebno je napraviti datoteku *imedatoteke.rao* u kojoj se definira koje prijenosne funkcije program treba napraviti. Za svih devet tijela potrebne su nam prijenosne funkcije rotacijskih pomaka oko x i y osi odnosno ljuljanje i posrtanje. Za proračun su izabrana tijela 1, 4 i 9 pa se njihove prijenosne funkcije za ljuljanje i posrtanje dobiju naredbama:

GROLL BODY 1

GPITCH BODY 1

GROLL BODY 4

GPITCH BODY 4

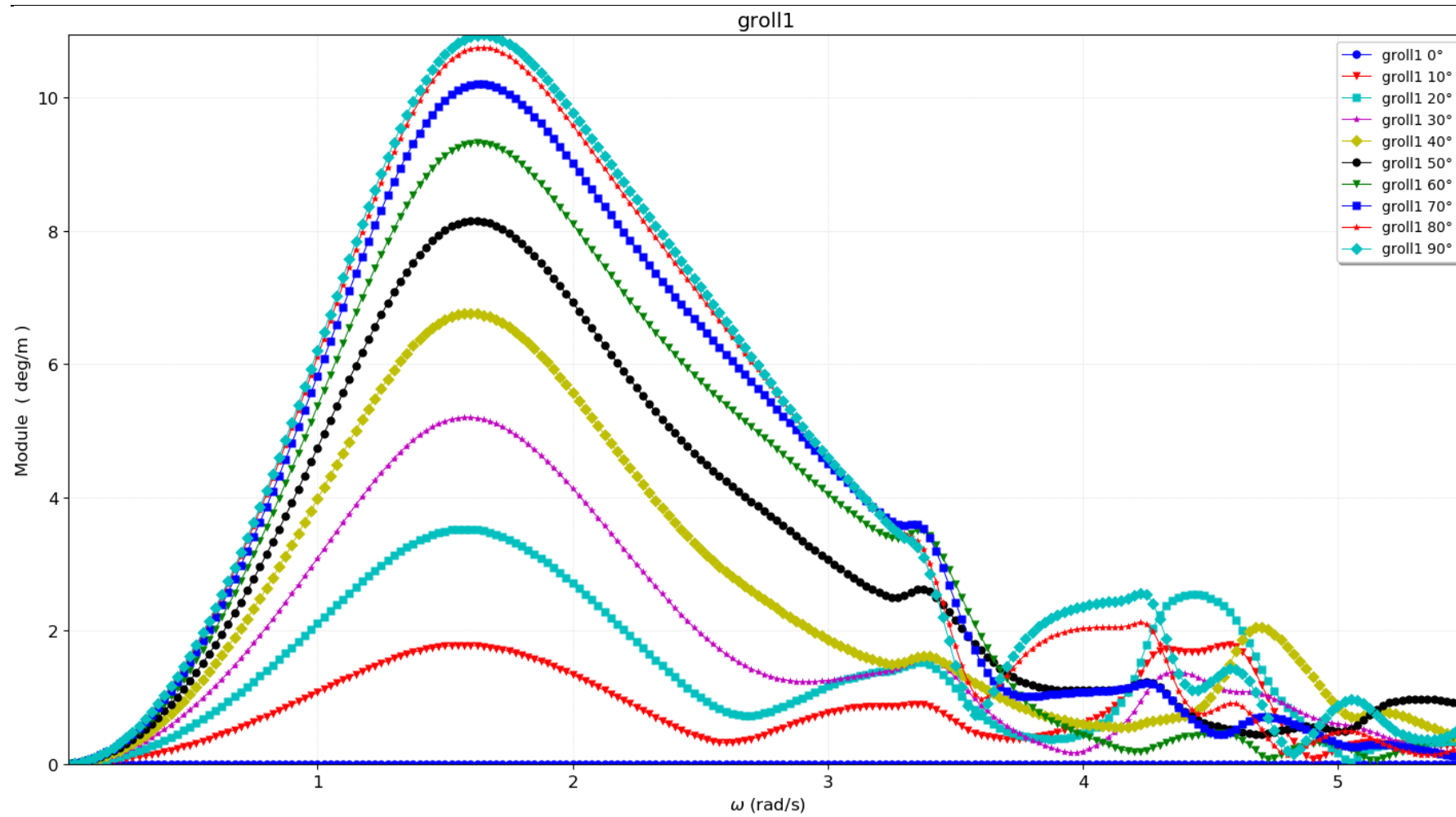
GROLL BODY 9

GPITCH BODY 9

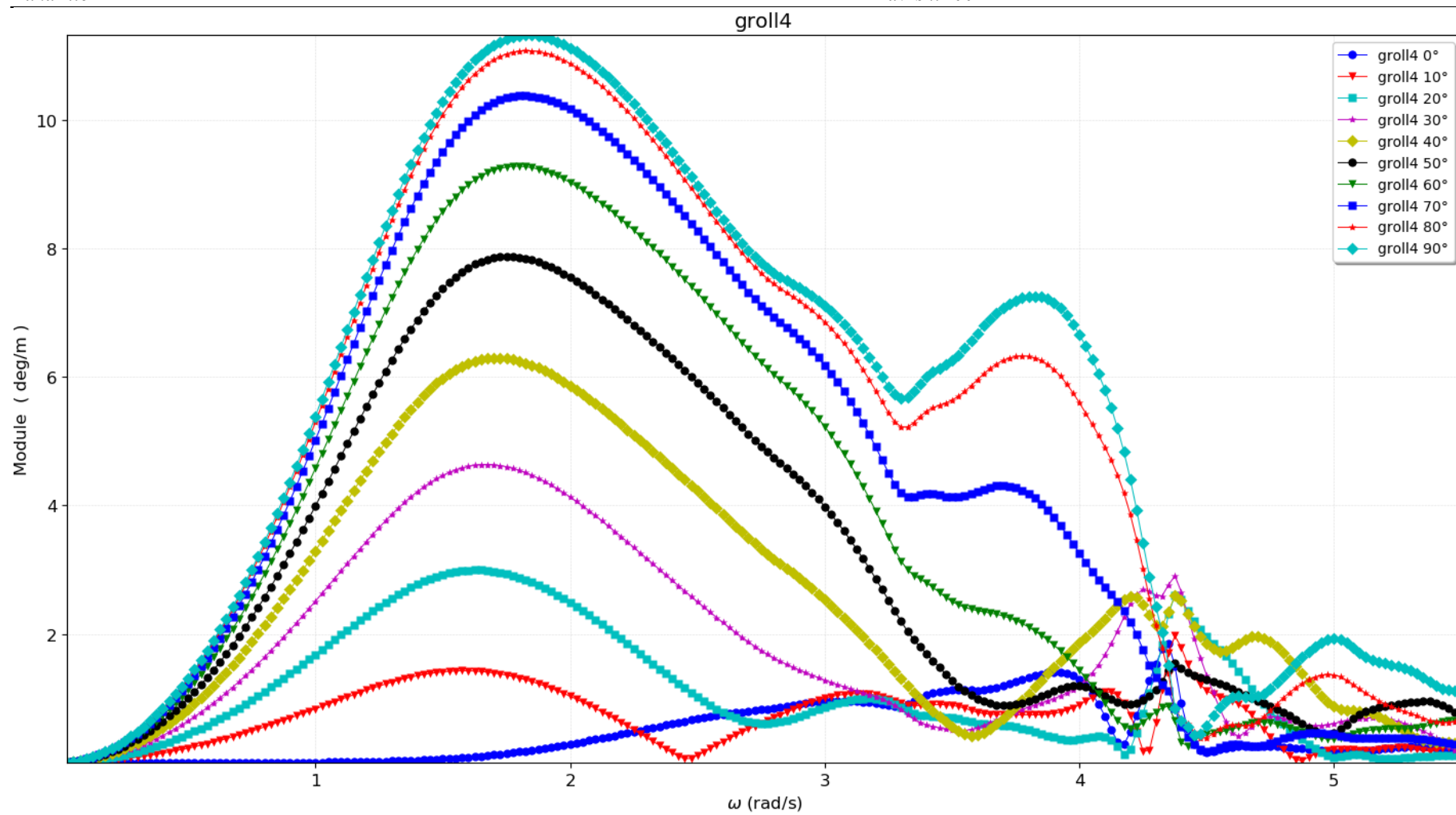
odnosno pozivanjem naredbe *hsrao imedatoteke.rao* koja pokreće datoteku s ovim naredbama.

Nakon završetka proračuna za dobivanje prijenosnih funkcija dobiju se odzivi za ova tijela.

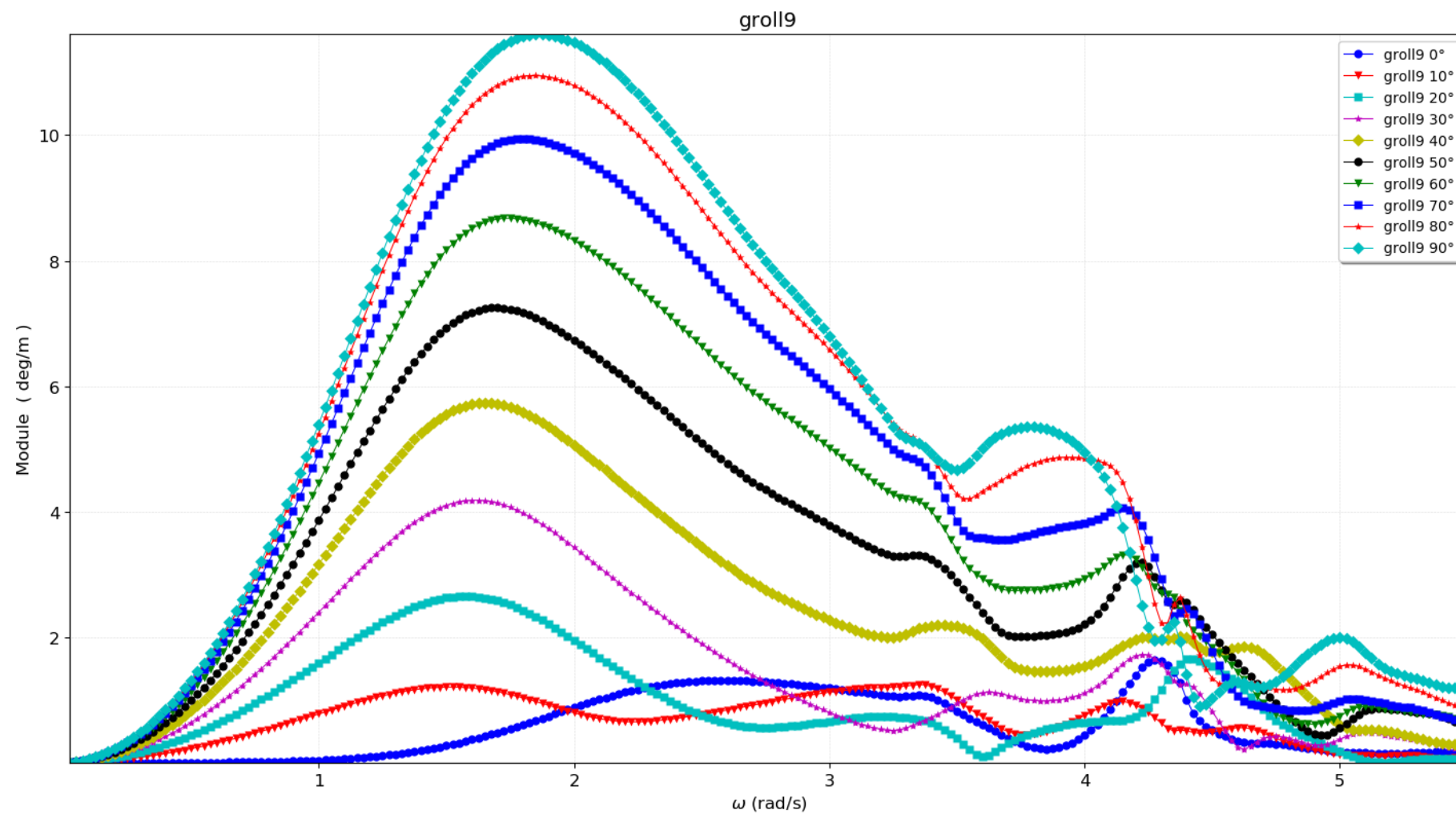
Na slikama su prikazani odzivi za tijela 1, 4 i 9



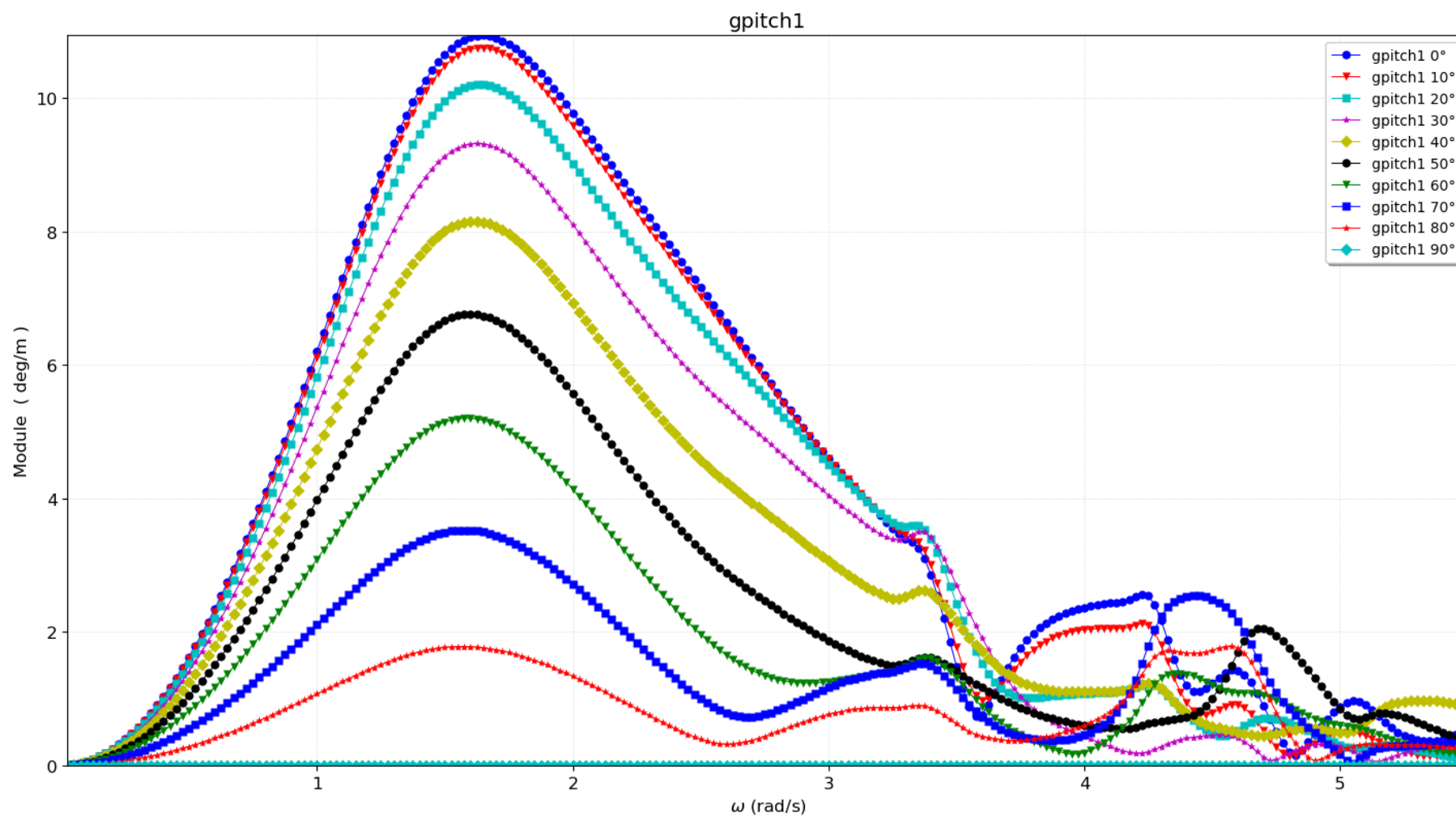
Slika 16. Prikaz prijenosnih funkcija pontona 1 za ljujanje



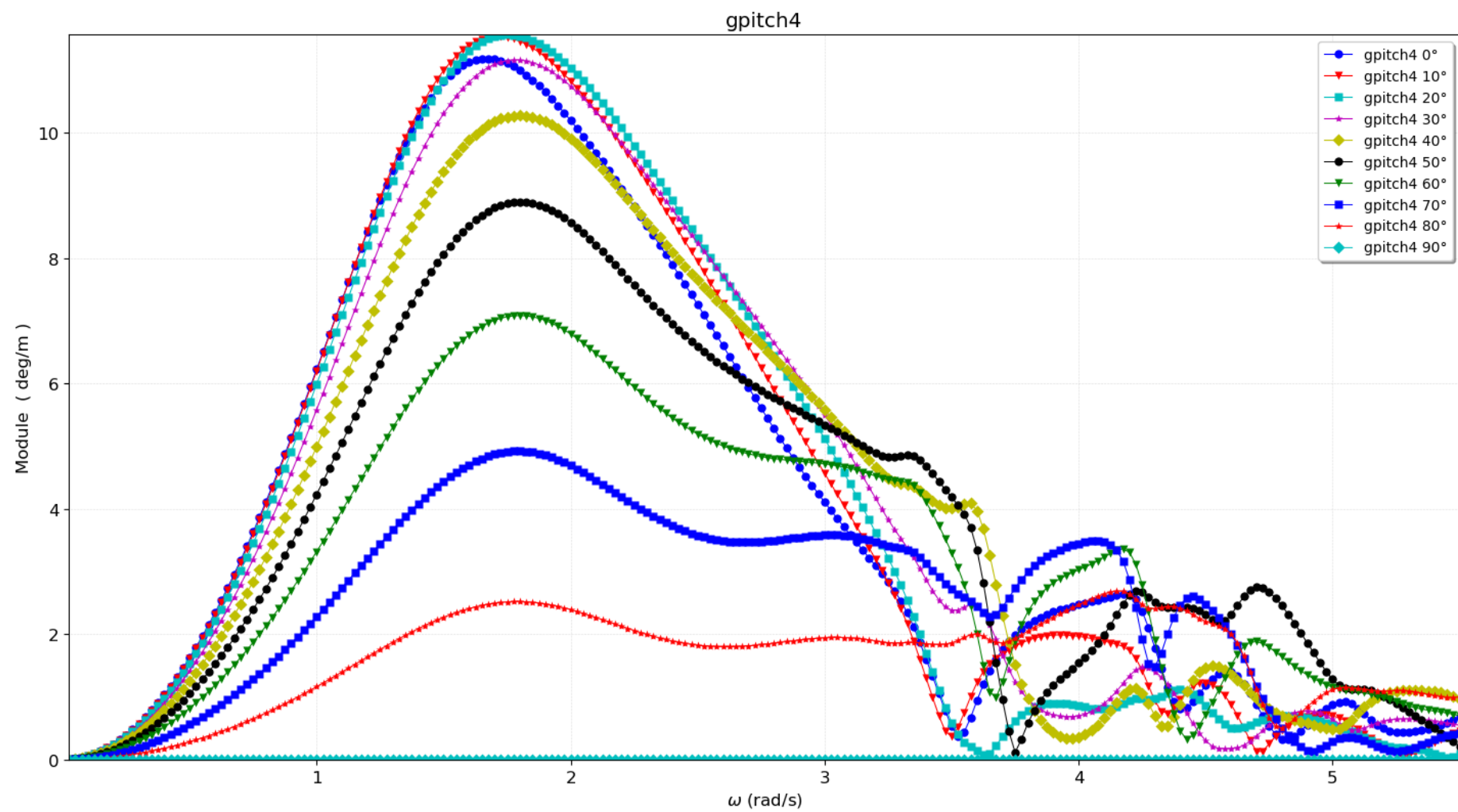
Slika 17. Prikaz prijenosnih funkcija pontona 4 za ljuljanje



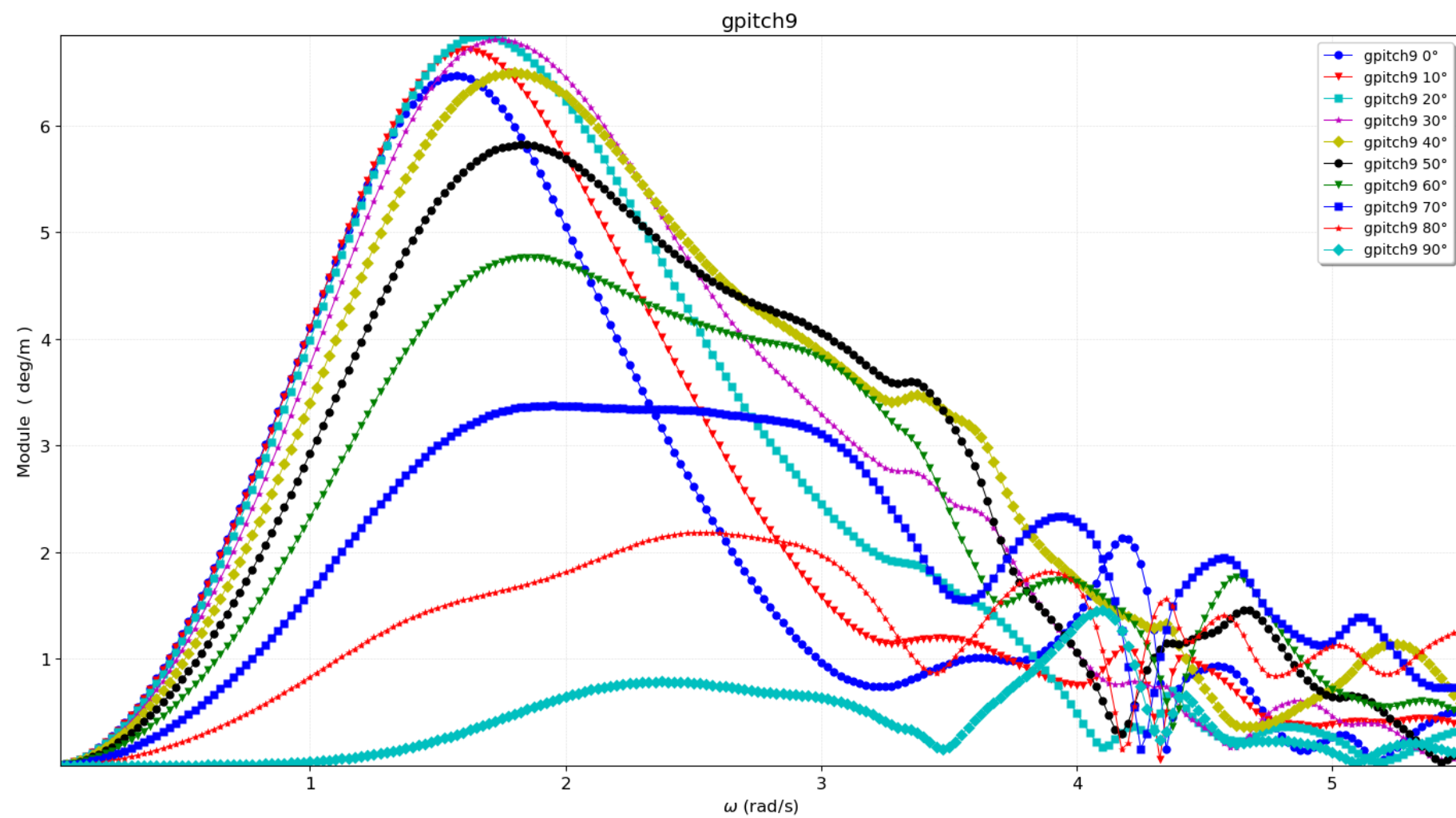
Slika 18. Prikaz prijenosnih funkcija pontona 9 za ljuljanje



Slika 19. Prikaz prijenosnih funkcija pontona 1 za posrtanje



Slika 20. Prikaz prijenosnih funkcija pontona 4 za posrtanje



Slika 21. Prikaz prijenosnih funkcija pontona 9 za posrtanje

#### 4.6. Spektralna analiza odziva

Nakon što su izračunate prijenosne funkcije potrebno je izračunati odziv plutajućih tijela.

Da bi se izračunao spektar odziva, kao što je već spomenuto, potrebno je imati prijenosne funkcije i spektar valova. Za potrebe ovog zadatka odabran je teorijski spektar JONSWAP s parametrom  $\gamma = 3,3$ . Za računanje spektra odziva koristi se modul StarSpec koji računa:

- spektralne momente
- kratkoročni odziv
- dugoročni odziv
- zamorna oštećenja

Ulazna datoteka za proračun spektra odziva mora sadržavati:

- podatke o prijenosnim funkcijama
- zadano stanje mora
- odabrani spektar valova
- raspon i korak integracije
- tip izlaznih podataka koje trebamo dobiti

Kako bi zadali stanje mora moramo odrediti nailazni smjer valova, značajnu valnu visinu i period vala. Određeno je da promatramo odziv za slučaje značajne valne visine od 1,5 m i 2,5 m. Period se računa preko sljedećeg izraza za kutnu frekvenciju (prema definiciji za Tabainov spektar):

$$\omega_m = 0,32 + \frac{1.8}{H_s + 0.60} \quad (4.13)$$

pa je period:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (4.14)$$

Tako za značajnu valnu visinu 1,5 m period iznosi 5.34 s, a za značajnu valnu visinu 2,5 m period iznosi 6.97 s.

Pokretanjem modula StarSpec naredbom *Hspec imedatoteke.hspc* program nam daje rezultate u obliku koji smo naveli u hspc datoteci. U tablicama od 1 do 12 vrijednosti spektralnog momenta  $m_0$  su poredane od najveće prema najmanjoj.

**4.6.1. Ponton 1**Tablica 1. Izlazni podaci za posrtanje  $H_s = 1,5$  m

| RAO     | x    | NSS | Azimut | m0       | smjer nailaska vala 1 | Hs 1     | Tp 1     | Gamma    |
|---------|------|-----|--------|----------|-----------------------|----------|----------|----------|
| gpitch1 | 1.25 | 1   | 270    | 4.68E+00 | 1.80E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch1 | 1.25 | 2   | 270    | 4.17E+00 | 1.90E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch1 | 1.25 | 3   | 270    | 3.70E+00 | 2.00E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch1 | 1.25 | 4   | 270    | 3.25E+00 | 2.10E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch1 | 1.25 | 5   | 270    | 2.83E+00 | 2.20E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch1 | 1.25 | 6   | 270    | 2.44E+00 | 2.30E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch1 | 1.25 | 7   | 270    | 2.08E+00 | 2.40E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch1 | 1.25 | 8   | 270    | 1.75E+00 | 2.50E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch1 | 1.25 | 9   | 270    | 1.44E+00 | 2.60E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch1 | 1.25 | 10  | 270    | 1.17E+00 | 2.70E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |

Tablica 2. Izlazni podaci za ljuľanje  $H_s = 1,5$  m

| RAO    | x    | NSS | Azimut | m0       | smjer nailaska vala 1 | Hs 1     | Tp 1     | Gamma    |
|--------|------|-----|--------|----------|-----------------------|----------|----------|----------|
| groll1 | 1.25 | 10  | 270    | 4.68E+00 | 2.70E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| groll1 | 1.25 | 9   | 270    | 4.17E+00 | 2.60E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| groll1 | 1.25 | 8   | 270    | 3.70E+00 | 2.50E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| groll1 | 1.25 | 7   | 270    | 3.25E+00 | 2.40E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| groll1 | 1.25 | 6   | 270    | 2.83E+00 | 2.30E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| groll1 | 1.25 | 5   | 270    | 2.44E+00 | 2.20E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| groll1 | 1.25 | 4   | 270    | 2.08E+00 | 2.10E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| groll1 | 1.25 | 3   | 270    | 1.75E+00 | 2.00E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| groll1 | 1.25 | 2   | 270    | 1.44E+00 | 1.90E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| groll1 | 1.25 | 1   | 270    | 1.17E+00 | 1.80E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |

Tablica 3. Izlazni podaci za posrtanje  $H_s = 2,5$  m

| RAO     | x    | NSS | Azimut | m0       | smjer nailaska vala 1 | Hs 1     | Tp 1     | Gamma    |
|---------|------|-----|--------|----------|-----------------------|----------|----------|----------|
| gpitch1 | 1.25 | 11  | 270    | 7.66E+00 | 1.80E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch1 | 1.25 | 12  | 270    | 6.83E+00 | 1.90E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch1 | 1.25 | 13  | 270    | 6.05E+00 | 2.00E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch1 | 1.25 | 14  | 270    | 5.32E+00 | 2.10E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch1 | 1.25 | 15  | 270    | 4.64E+00 | 2.20E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch1 | 1.25 | 16  | 270    | 4.00E+00 | 2.30E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch1 | 1.25 | 17  | 270    | 3.41E+00 | 2.40E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch1 | 1.25 | 18  | 270    | 2.86E+00 | 2.50E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch1 | 1.25 | 19  | 270    | 2.37E+00 | 2.60E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch1 | 1.25 | 20  | 270    | 1.92E+00 | 2.70E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |

Tablica 4. Izlazni podaci za ljuľanje  $H_s = 2,5$  m

| RAO    | x    | NSS | Azimut | m0       | smjer nailaska vala 1 | Hs 1     | Tp 1     | Gamma    |
|--------|------|-----|--------|----------|-----------------------|----------|----------|----------|
| groll1 | 1.25 | 20  | 270    | 7.66E+00 | 2.70E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| groll1 | 1.25 | 19  | 270    | 6.83E+00 | 2.60E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| groll1 | 1.25 | 18  | 270    | 6.05E+00 | 2.50E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| groll1 | 1.25 | 17  | 270    | 5.32E+00 | 2.40E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| groll1 | 1.25 | 16  | 270    | 4.64E+00 | 2.30E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| groll1 | 1.25 | 15  | 270    | 4.00E+00 | 2.20E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| groll1 | 1.25 | 14  | 270    | 3.41E+00 | 2.10E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| groll1 | 1.25 | 13  | 270    | 2.86E+00 | 2.00E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| groll1 | 1.25 | 12  | 270    | 2.37E+00 | 1.90E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| groll1 | 1.25 | 11  | 270    | 1.92E+00 | 1.80E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |

**4.6.2. Ponton 4**Tablica 5. Izlazni podaci za posrtanje  $H_s = 1,5$  m

| RAO     | x    | NSS | Azimut | m0       | smjer nailaska vala 1 | Hs 1     | Tp 1     | Gamma    |
|---------|------|-----|--------|----------|-----------------------|----------|----------|----------|
| gpitch4 | 1.25 | 1   | 270    | 4.80E+00 | 1.80E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch4 | 1.25 | 2   | 270    | 4.28E+00 | 1.90E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch4 | 1.25 | 3   | 270    | 3.79E+00 | 2.00E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch4 | 1.25 | 4   | 270    | 3.33E+00 | 2.10E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch4 | 1.25 | 5   | 270    | 2.90E+00 | 2.20E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch4 | 1.25 | 6   | 270    | 2.50E+00 | 2.30E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch4 | 1.25 | 7   | 270    | 2.13E+00 | 2.40E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch4 | 1.25 | 8   | 270    | 1.79E+00 | 2.50E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch4 | 1.25 | 9   | 270    | 1.48E+00 | 2.60E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch4 | 1.25 | 10  | 270    | 1.20E+00 | 2.70E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |

Tablica 6. Izlazni podaci za ljuljanje  $H_s = 1,5$  m

| RAO    | x    | NSS | Azimut | m0       | smjer nailaska vala 1 | Hs 1     | Tp 1     | Gamma    |
|--------|------|-----|--------|----------|-----------------------|----------|----------|----------|
| groll4 | 1.25 | 10  | 270    | 4.40E+00 | 2.70E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| groll4 | 1.25 | 9   | 270    | 3.94E+00 | 2.60E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| groll4 | 1.25 | 8   | 270    | 3.49E+00 | 2.50E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| groll4 | 1.25 | 7   | 270    | 3.08E+00 | 2.40E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| groll4 | 1.25 | 6   | 270    | 2.69E+00 | 2.30E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| groll4 | 1.25 | 5   | 270    | 2.33E+00 | 2.20E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| groll4 | 1.25 | 4   | 270    | 1.99E+00 | 2.10E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| groll4 | 1.25 | 3   | 270    | 1.68E+00 | 2.00E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| groll4 | 1.25 | 2   | 270    | 1.40E+00 | 1.90E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| groll4 | 1.25 | 1   | 270    | 1.14E+00 | 1.80E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |

Tablica 7. Izlazni podaci za posrtanje  $H_s = 2,5$  m

| RAO     | x    | NSS | Azimut | m0       | smjer nailaska vala 1 | Hs 1     | Tp 1     | Gamma    |
|---------|------|-----|--------|----------|-----------------------|----------|----------|----------|
| gpitch4 | 1.25 | 11  | 270    | 7.80E+00 | 1.80E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch4 | 1.25 | 12  | 270    | 6.96E+00 | 1.90E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch4 | 1.25 | 13  | 270    | 6.17E+00 | 2.00E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch4 | 1.25 | 14  | 270    | 5.42E+00 | 2.10E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch4 | 1.25 | 15  | 270    | 4.72E+00 | 2.20E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch4 | 1.25 | 16  | 270    | 4.07E+00 | 2.30E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch4 | 1.25 | 17  | 270    | 3.47E+00 | 2.40E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch4 | 1.25 | 18  | 270    | 2.91E+00 | 2.50E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch4 | 1.25 | 19  | 270    | 2.41E+00 | 2.60E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch4 | 1.25 | 20  | 270    | 1.95E+00 | 2.70E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |

Tablica 8. Izlazni podaci za ljuljanje  $H_s = 2,5$  m

| RAO    | x    | NSS | Azimut | m0       | smjer nailaska vala 1 | Hs 1     | Tp 1     | Gamma    |
|--------|------|-----|--------|----------|-----------------------|----------|----------|----------|
| groll4 | 1.25 | 20  | 270    | 6.64E+00 | 2.70E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| groll4 | 1.25 | 19  | 270    | 5.93E+00 | 2.60E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| groll4 | 1.25 | 18  | 270    | 5.26E+00 | 2.50E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| groll4 | 1.25 | 17  | 270    | 4.63E+00 | 2.40E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| groll4 | 1.25 | 16  | 270    | 4.05E+00 | 2.30E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| groll4 | 1.25 | 15  | 270    | 3.50E+00 | 2.20E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| groll4 | 1.25 | 14  | 270    | 2.99E+00 | 2.10E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| groll4 | 1.25 | 13  | 270    | 2.52E+00 | 2.00E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| groll4 | 1.25 | 12  | 270    | 2.09E+00 | 1.90E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| groll4 | 1.25 | 11  | 270    | 1.70E+00 | 1.80E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |

**4.6.3. Ponton 9**Tablica 9. Izlazni podaci za posrtanje  $H_s = 1,5$  m

| RAO     | x    | NSS | Azimut | m0       | smjer nailaska vala 1 | Hs 1     | Tp 1     | Gamma    |
|---------|------|-----|--------|----------|-----------------------|----------|----------|----------|
| gpitch9 | 4.45 | 1   | 270    | 1.79E+00 | 1.80E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch9 | 4.45 | 2   | 270    | 1.61E+00 | 1.90E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch9 | 4.45 | 3   | 270    | 1.43E+00 | 2.00E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch9 | 4.45 | 4   | 270    | 1.27E+00 | 2.10E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch9 | 4.45 | 5   | 270    | 1.12E+00 | 2.20E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch9 | 4.45 | 6   | 270    | 9.72E-01 | 2.30E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch9 | 4.45 | 7   | 270    | 8.38E-01 | 2.40E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch9 | 4.45 | 8   | 270    | 7.15E-01 | 2.50E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch9 | 4.45 | 9   | 270    | 6.01E-01 | 2.60E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch9 | 4.45 | 10  | 270    | 4.97E-01 | 2.70E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |

Tablica 10. Izlazni podaci za ljuljanje  $H_s = 1,5$  m

| RAO    | x    | NSS | Azimut | m0       | smjer nailaska vala 1 | Hs 1     | Tp 1     | Gamma    |
|--------|------|-----|--------|----------|-----------------------|----------|----------|----------|
| groll9 | 4.45 | 10  | 270    | 4.60E+00 | 2.70E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| groll9 | 4.45 | 9   | 270    | 4.13E+00 | 2.60E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| groll9 | 4.45 | 8   | 270    | 3.68E+00 | 2.50E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| groll9 | 4.45 | 7   | 270    | 3.26E+00 | 2.40E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| groll9 | 4.45 | 6   | 270    | 2.87E+00 | 2.30E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| groll9 | 4.45 | 5   | 270    | 2.50E+00 | 2.20E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| groll9 | 4.45 | 4   | 270    | 2.15E+00 | 2.10E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| groll9 | 4.45 | 3   | 270    | 1.83E+00 | 2.00E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| groll9 | 4.45 | 2   | 270    | 1.54E+00 | 1.90E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |
| groll9 | 4.45 | 1   | 270    | 1.27E+00 | 1.80E+02              | 1.50E+00 | 5.34E+00 | 3.30E+00 |

Tablica 11. Izlazni podaci za posrtanje  $H_s = 2,5$  m

| RAO     | x    | NSS | Azimut | m0       | smjer nailaska vala 1 | Hs 1     | Tp 1     | Gamma    |
|---------|------|-----|--------|----------|-----------------------|----------|----------|----------|
| gpitch9 | 4.45 | 11  | 270    | 3.15E+00 | 1.80E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch9 | 4.45 | 12  | 270    | 2.82E+00 | 1.90E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch9 | 4.45 | 13  | 270    | 2.51E+00 | 2.00E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch9 | 4.45 | 14  | 270    | 2.22E+00 | 2.10E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch9 | 4.45 | 15  | 270    | 1.94E+00 | 2.20E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch9 | 4.45 | 16  | 270    | 1.69E+00 | 2.30E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch9 | 4.45 | 17  | 270    | 1.45E+00 | 2.40E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch9 | 4.45 | 18  | 270    | 1.23E+00 | 2.50E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch9 | 4.45 | 19  | 270    | 1.03E+00 | 2.60E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| gpitch9 | 4.45 | 20  | 270    | 8.46E-01 | 2.70E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |

Tablica 12. izlazni podaci za ljuljanje  $H_s = 2,5$  m

| RAO    | x    | NSS | Azimut | m0       | smjer nailaska vala 1 | Hs 1     | Tp 1     | Gamma    |
|--------|------|-----|--------|----------|-----------------------|----------|----------|----------|
| groll9 | 4.45 | 20  | 270    | 6.87E+00 | 2.70E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| groll9 | 4.45 | 19  | 270    | 6.16E+00 | 2.60E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| groll9 | 4.45 | 18  | 270    | 5.48E+00 | 2.50E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| groll9 | 4.45 | 17  | 270    | 4.84E+00 | 2.40E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| groll9 | 4.45 | 16  | 270    | 4.25E+00 | 2.30E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| groll9 | 4.45 | 15  | 270    | 3.69E+00 | 2.20E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| groll9 | 4.45 | 14  | 270    | 3.17E+00 | 2.10E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| groll9 | 4.45 | 13  | 270    | 2.69E+00 | 2.00E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| groll9 | 4.45 | 12  | 270    | 2.26E+00 | 1.90E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |
| groll9 | 4.45 | 11  | 270    | 1.86E+00 | 1.80E+02              | 2.50E+00 | 6.97E+00 | 3.30E+00 |

#### 4.7. Računanje utjecaja ljuljanja i posrtanja na insolaciju

Iz izlaznih tablica se vidi da su vrijednosti nultog spektralnog momenta za ljuljanje najveće kada valovi nailaze pod kutom od 270 stupnjeva, a za posrtanje za smjer nailaska 180 stupnjeva. Stoga za računanje utjecaja gibanja tijela na insolaciju izabiremo najnepovoljnije slučajeve. Za ponton 1 uzimamo vrijednost nultog spektralnog momenta prilikom posrtanja za smjer nailaska valova 180 stupnjeva za obje značajne valne visine. Za ponton 4 također uzimamo istu vrijednost, dok za ponton 9 uzimamo vrijednost nultog spektralnog momenta prilikom ljuljanja za smjer nailaska 270 stupnjeva.

U ovom radu ćemo uzeti u obzir samo utjecaj gibanja na direktno zračenje pa izraz za ukupno zračenje glasi:

$$I_{UK} = I_D = I_{DN} \cdot \cos(\theta) \quad (4.15)$$

Uz korištenje matematičkih relacija, utjecaj gibanja pontona na insolaciju može se izraziti preko člana  $\cos(\theta)$  u gornjoj jednadžbi pa je dobiveno da se  $\cos(\theta)$  može izraziti preko formule:

$$\cos(\theta) = 1 - \frac{1}{2} \cdot m_0 \quad (4.16)$$

gdje  $m_0$  mora biti izražen u  $\text{rad}^2$ . Navedena formula vrijedi samo za idealnu poziciju izložene površine prema suncu tj. kada normala izložene površine leži na pravcu nailaska sunčevih zraka odnosno kada je vrijednost kuta  $\theta$  jednaka 0.

Preračunavanjem nultog spektralnog momenta u  $\text{rad}^2$  i uvrštavanjem  $m_0$  u izraz dobiju se sljedeći rezultati:

Tablica 13. Prikaz rezultata

| Ponton | Hs = 1.5 m                   | Hs = 2.5 m                   |
|--------|------------------------------|------------------------------|
| 1      | $\cos(\theta) = 0.999287195$ | $\cos(\theta) = 0.998833011$ |
| 4      | $\cos(\theta) = 0.999269223$ | $\cos(\theta) = 0.998811383$ |
| 9      | $\cos(\theta) = 0.999298923$ | $\cos(\theta) = 0.998953791$ |

Iz rezultata je vidljivo da je vrijednost  $\cos(\theta)$ , koja na iznos direktnog zračenja djeluje kao faktor umanjenja, približno jednaka 1. U najgorem slučaju, kod slučaja značajne valne visine 2.5 m na pontonu 4, korisnost panela će se smanjiti za približno 0.11886 %.

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom završnom radu napravljena je procjena ukupnog sunčevog zračenja na gibajuće površine 9 plutajućih tijela koja se nalaze u neposrednoj blizini. U proračun su uključene sile valova prvog reda kao i hidrodinamičke reakcije, tj. dodatna masa i radijacijsko prigušenje.

Nakon izvršenog proračuna u programskom zadatku HYDROSTAR dobivene su vrijednosti prijenosnih funkcija za ljuljanje i posrtanje svih tijela. Za pontone 1, 4 i 9 izabrane su prijenosne funkcije za smjer nailaska vala kod kojeg su vrijednosti prijenosnih funkcija najveće te se pomoću njih izračunao spektar odziva. Za izračunavanje spektra odziva korišten je spektar valova JONSWAP te značajne valne visine od 1,5 m i 2,5 m. Spektar odziva se računao s ciljem dobivanja nultog spektralnog momenta  $m_0$  koji se dalje koristio za procjenu utjecaja gibanja pontona na insolaciju izložene površine.

Iz dobivenih rezultata je vidljivo da gibanje na valovima ne utječe znatno na insolaciju odnosno da bi solarni paneli koji bi se nalazili na izloženoj gibajućoj površini imali približno jednaku korisnost kao i da su na nepomičnoj izloženoj površini. Treba napomenuti da je navedena procjena provedena za idealni slučaj, kada su solarni paneli postavljeni okomito na smjer nailaska sunčevih zraka.

---

**LITERATURA**

- [1] Čorić, V.; Prpić-Oršić J. : *Pomorstvenost plovnih objekata*; Zigo, Rijeka, 2006.
- [2] Tanocki, E. : *Završni rad*; Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [3] Martić, K. : *Završni rad*; Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2020.
- [4] Nekić, J. : *Diplomski rad*; Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek, 2017.
- [5] Čeović, J. : *Diplomski rad*; Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2011.
- [6] Smoljan, D : *Određivanje toplinskog opterećenja prostorije RTS metodom*, Zagreb, 2008
- [7] Bureau Veritas : HYDROSTAR FOR EXPERTS, 2020
- [8] Bureau Veritas : StarSpec, 2019
- [9] <https://en.wikipedia.org>

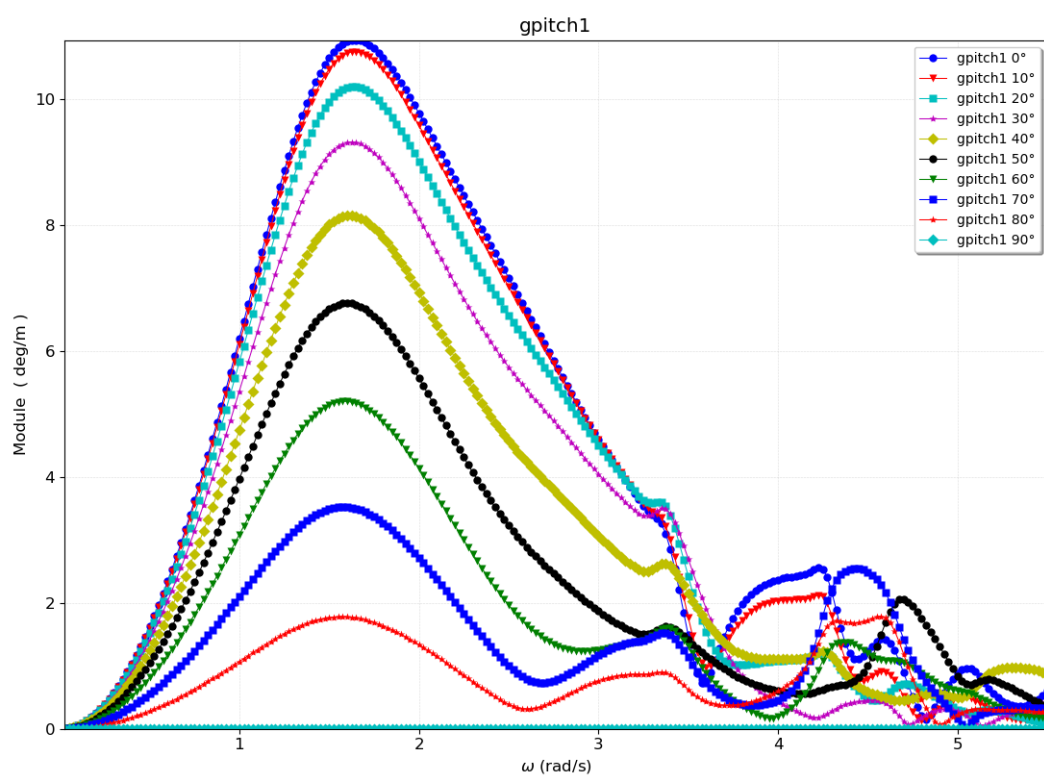
---

## **PRILOZI**

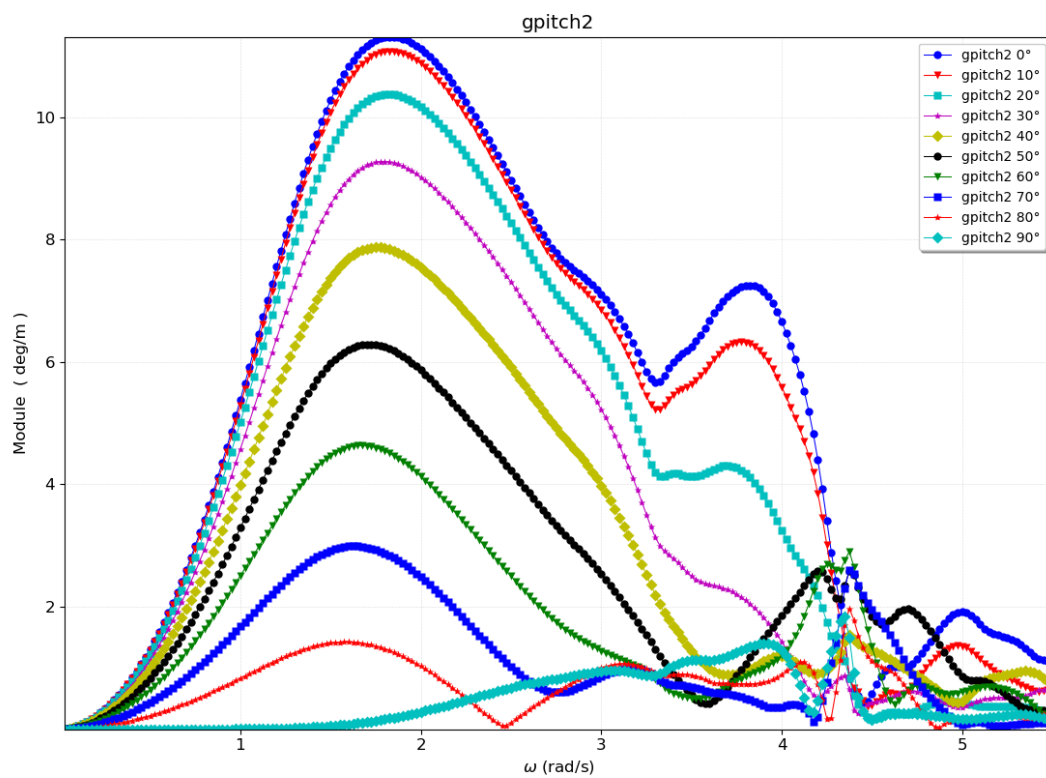
- I.      Prikaz prijenosnih funkcija ljujanja i valjanja svih pontona

**PRILOG I – Prikazi prijenosnih funkcija ljuljanja i valjanja svih pontona**

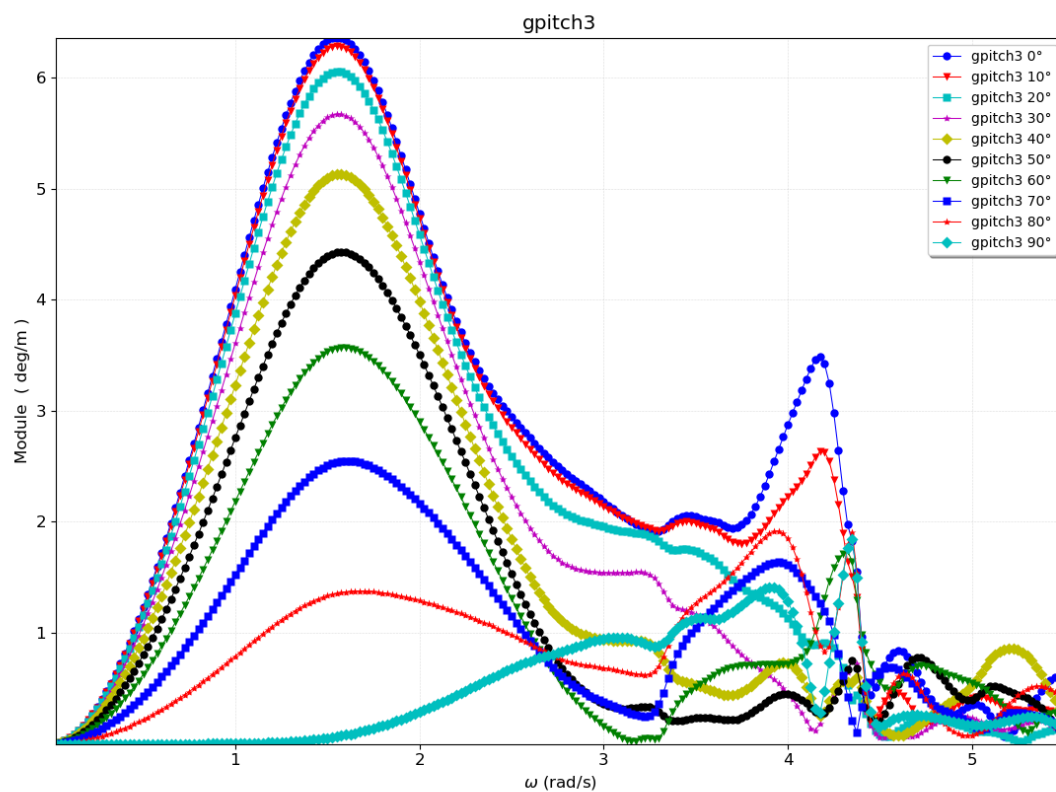
|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| Slika I.1. Prijenosna funkcija posrtanja pontona 1 .....  | 46 |
| Slika I.2. Prijenosna funkcija posrtanja pontona 2 .....  | 46 |
| Slika I.3. Prijenosna funkcija posrtanja pontona 3 .....  | 47 |
| Slika I.4. Prijenosna funkcija posrtanja pontona 4 .....  | 47 |
| Slika I.5. Prijenosna funkcija posrtanja pontona 5 .....  | 48 |
| Slika I.6. Prijenosna funkcija posrtanja pontona 2 .....  | 48 |
| Slika I.7. Prijenosna funkcija posrtanja pontona 7 .....  | 49 |
| Slika I.8. Prijenosna funkcija posrtanja pontona 8 .....  | 49 |
| Slika I.9. Prijenosna funkcija posrtanja pontona 9 .....  | 50 |
| Slika I.10. Prijenosna funkcija ljuljanja pontona 1 ..... | 50 |
| Slika I.11. Prijenosna funkcija ljuljanja pontona 2 ..... | 51 |
| Slika I.12. Prijenosna funkcija ljuljanja pontona 3 ..... | 51 |
| Slika I.13. Prijenosna funkcija ljuljanja pontona 4 ..... | 52 |
| Slika I.14. Prijenosna funkcija ljuljanja pontona 5 ..... | 52 |
| Slika I.15. Prijenosna funkcija ljuljanja pontona 6 ..... | 53 |
| Slika I.16. Prijenosna funkcija ljuljanja pontona 7 ..... | 53 |
| Slika I.17. Prijenosna funkcija ljuljanja pontona 8 ..... | 54 |
| Slika I.18. Prijenosna funkcija ljuljanja pontona 9 ..... | 54 |



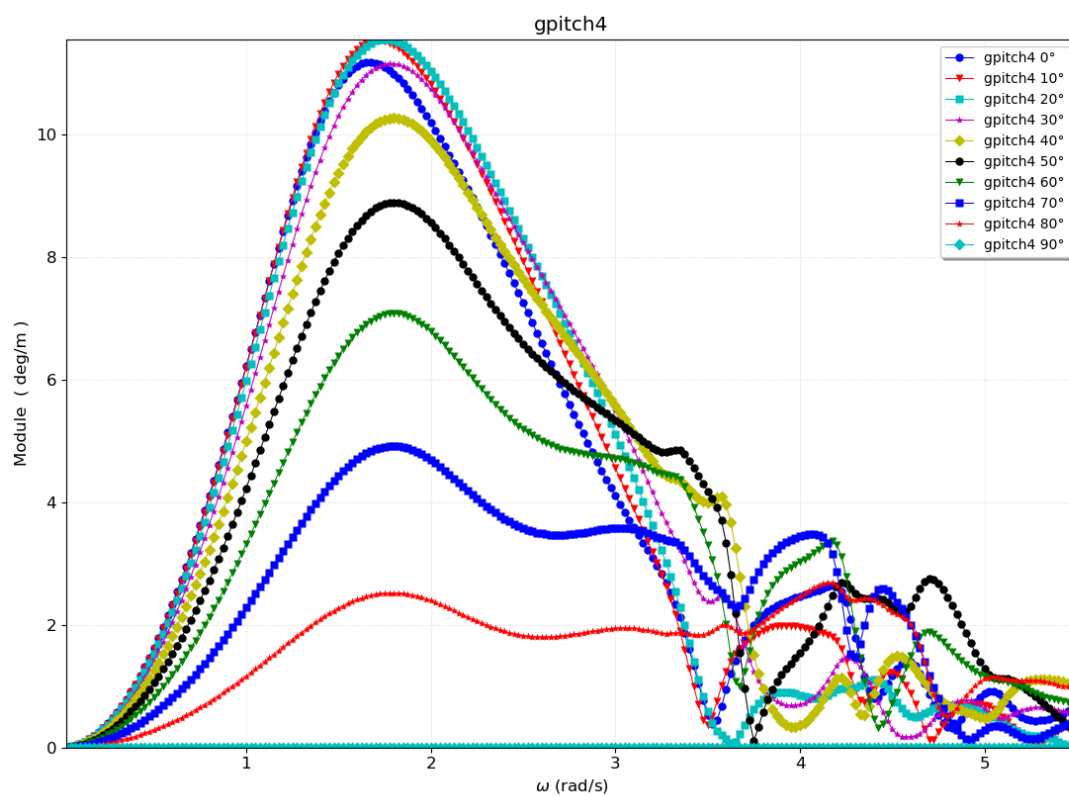
Slika I.1. Prijenosna funkcija posrtanja pontona 1



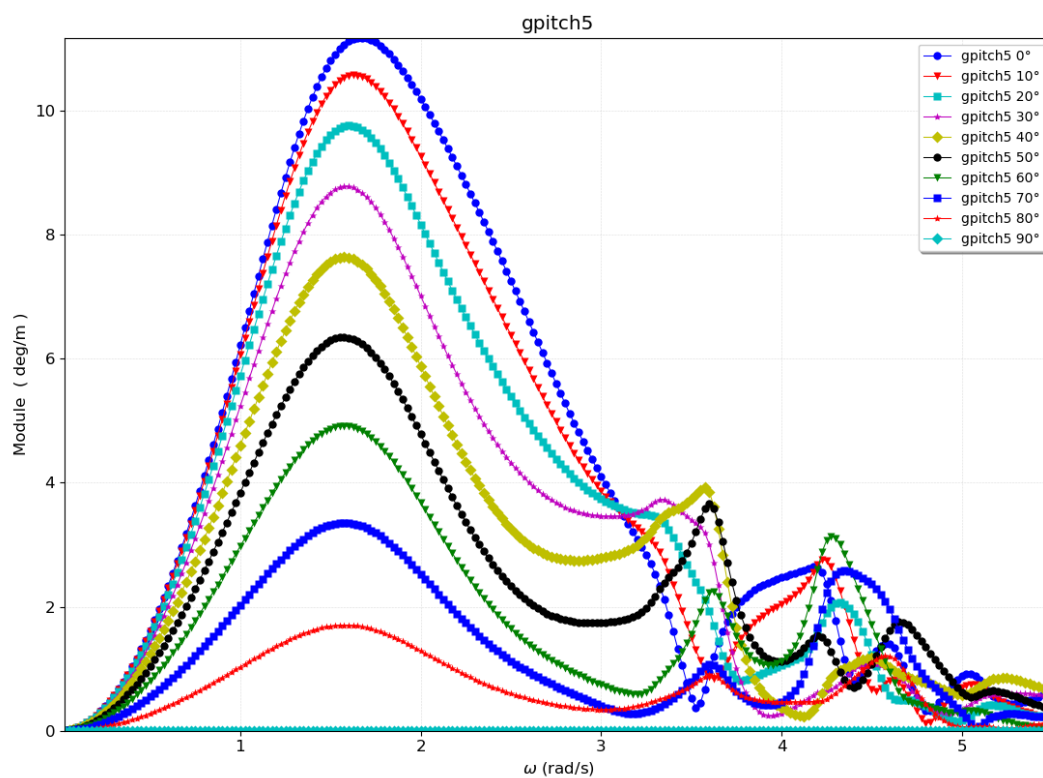
Slika I.2. Prijenosna funkcija posrtanja pontona 2



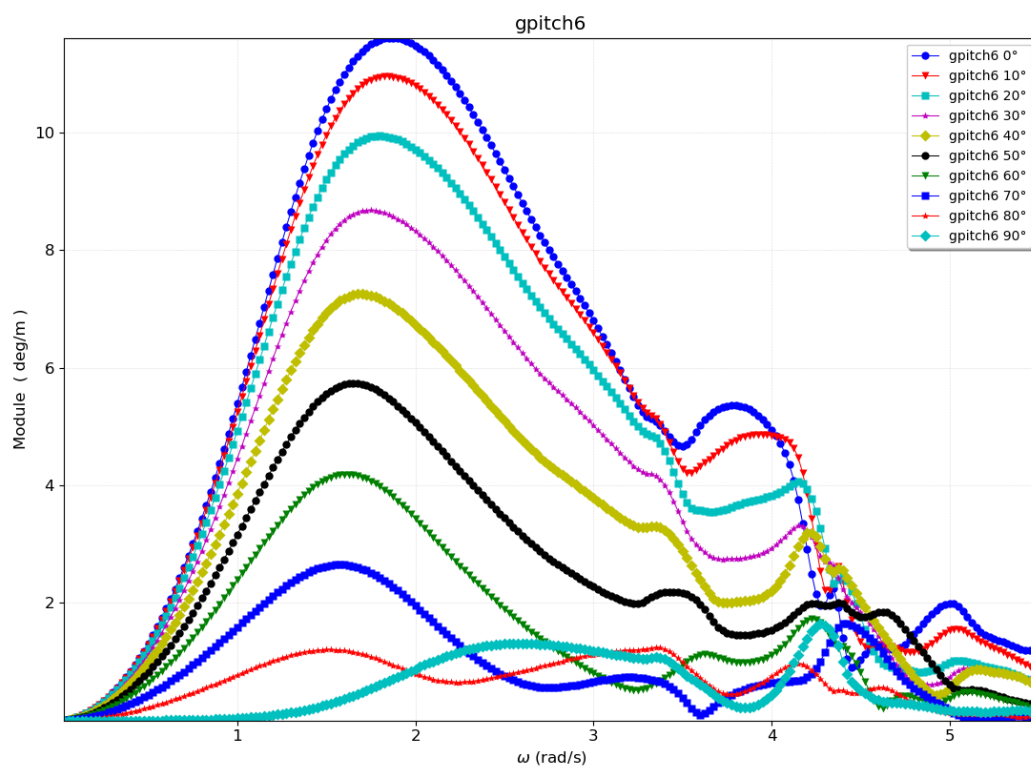
Slika I.3. Prijenosna funkcija posrtanja pontona 3



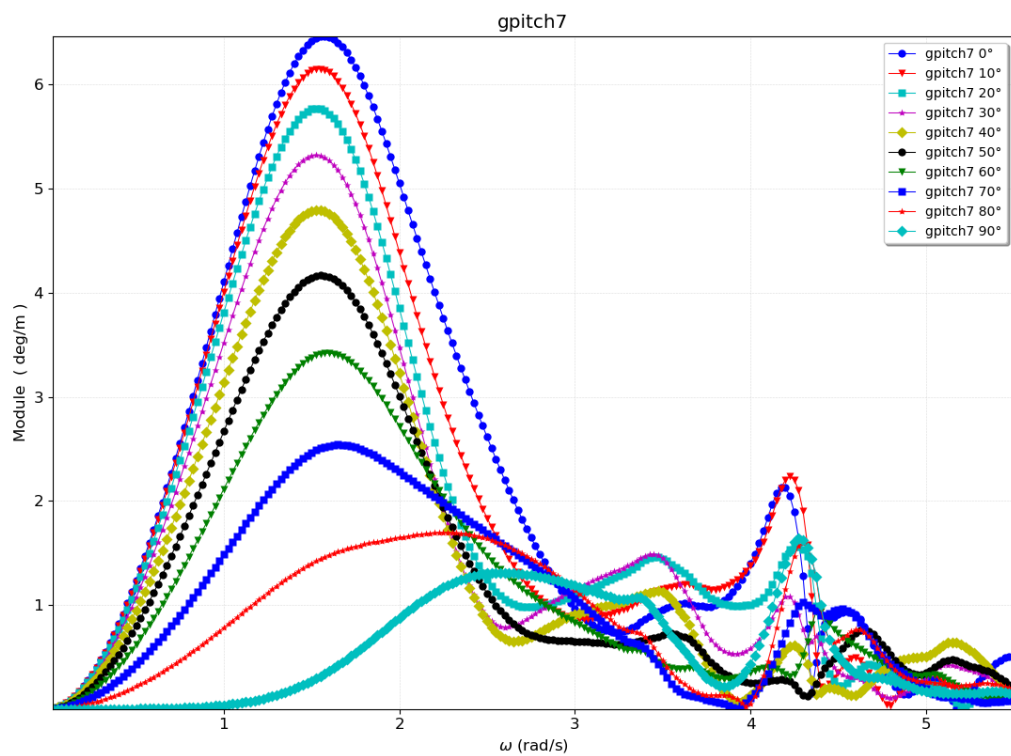
Slika I.4. Prijenosna funkcija posrtanja pontona 4



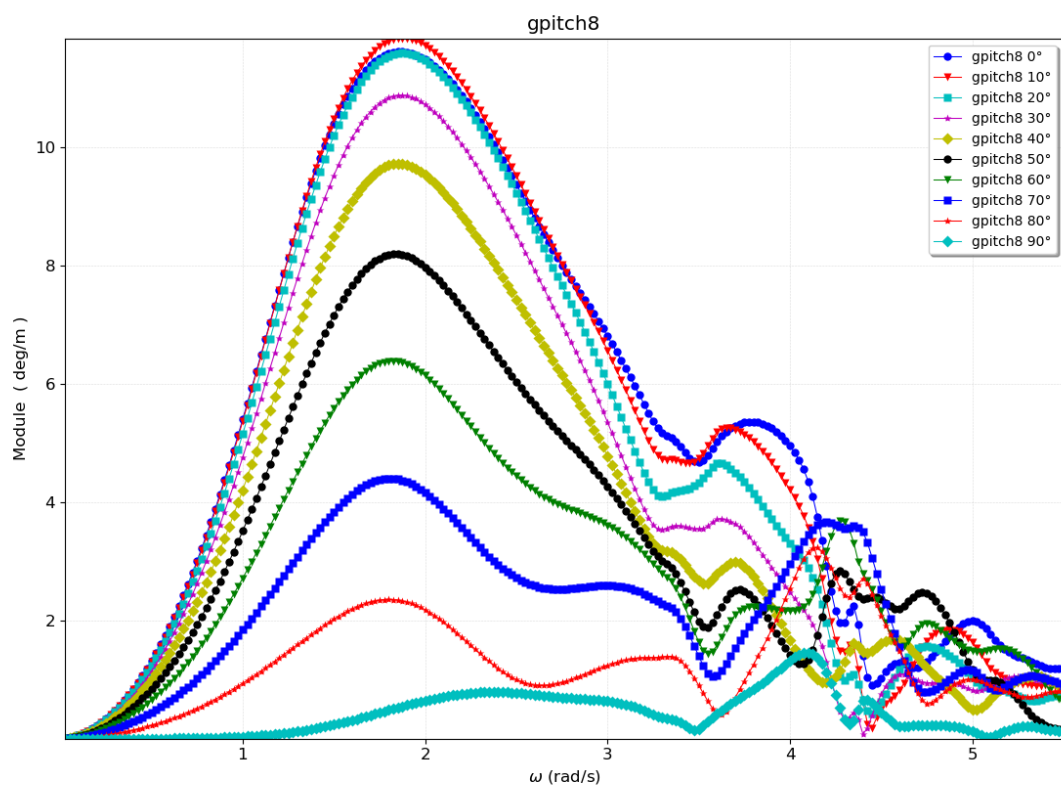
Slika I.5. Prijenosna funkcija posrtanja pontona 5



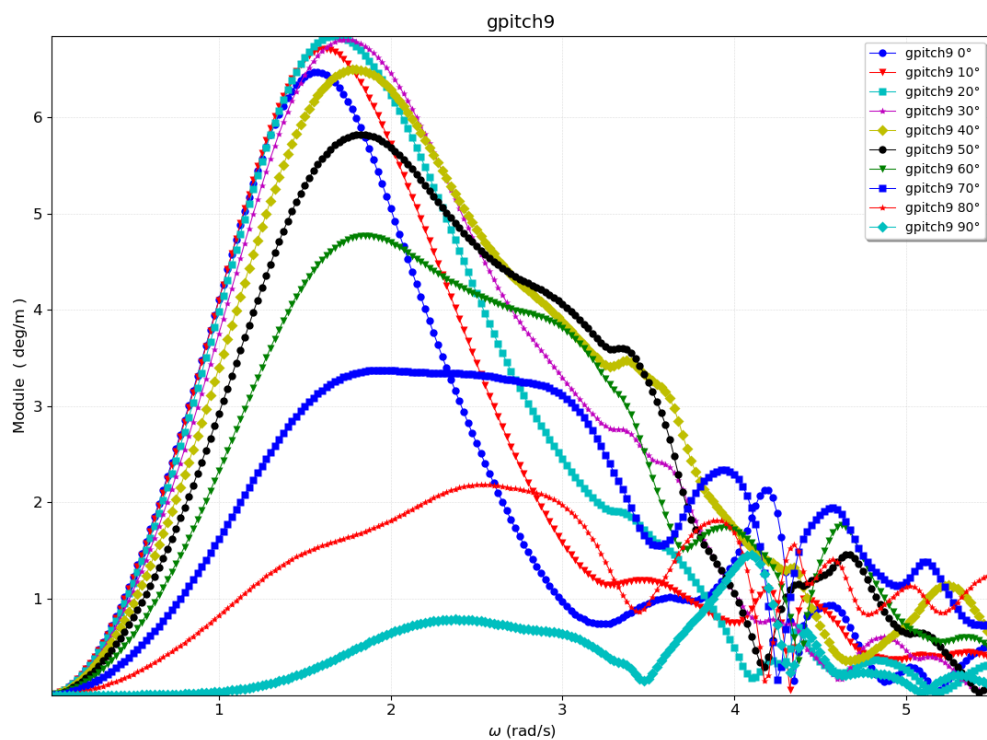
Slika I.6. Prijenosna funkcija posrtanja pontona 2



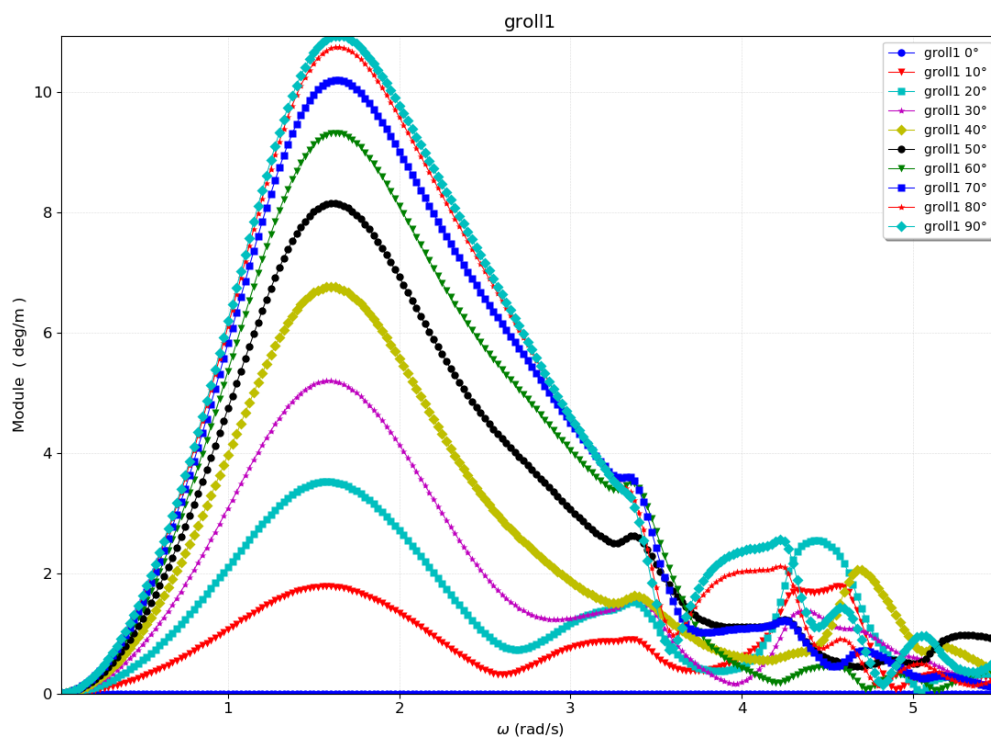
Slika I.7. Prijenosna funkcija posrtanja pontona 7



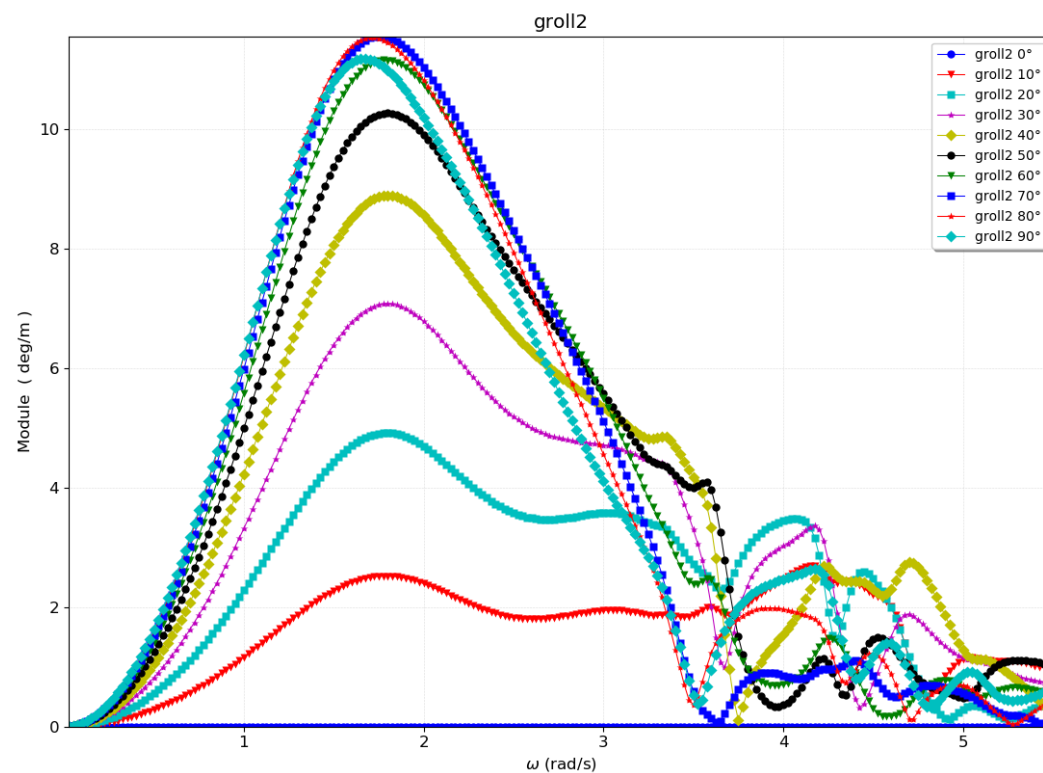
Slika I.8. Prijenosna funkcija posrtanja pontona 8



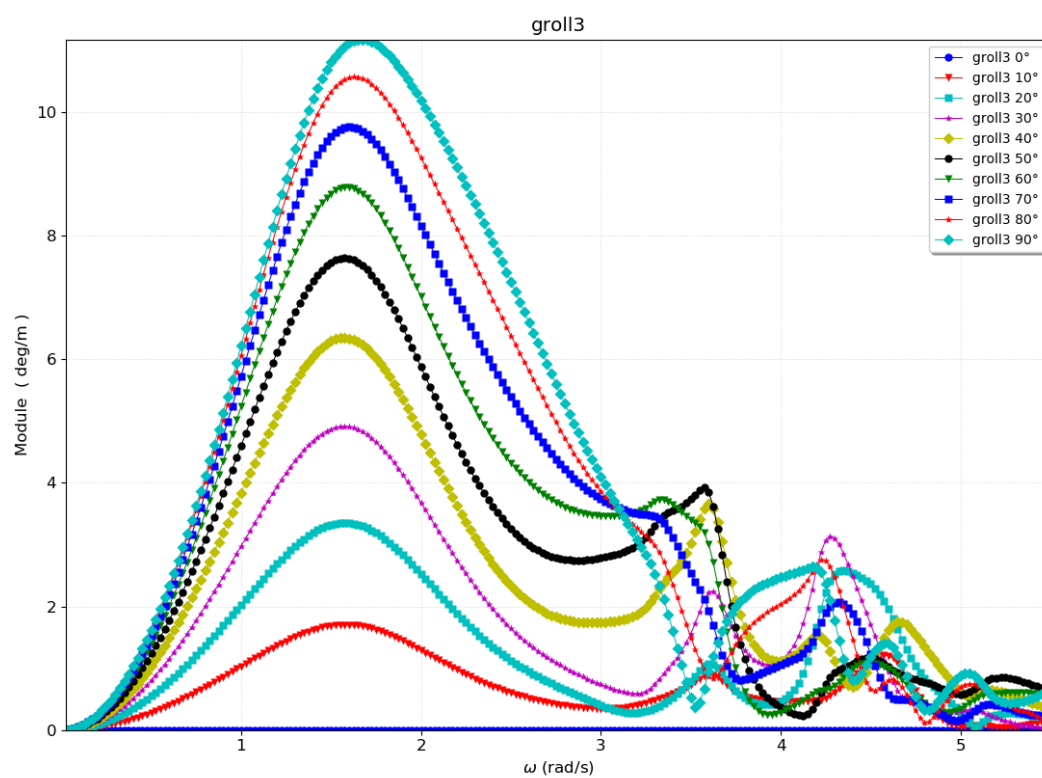
Slika I.9. Prijenosna funkcija posrtanja pontona 9



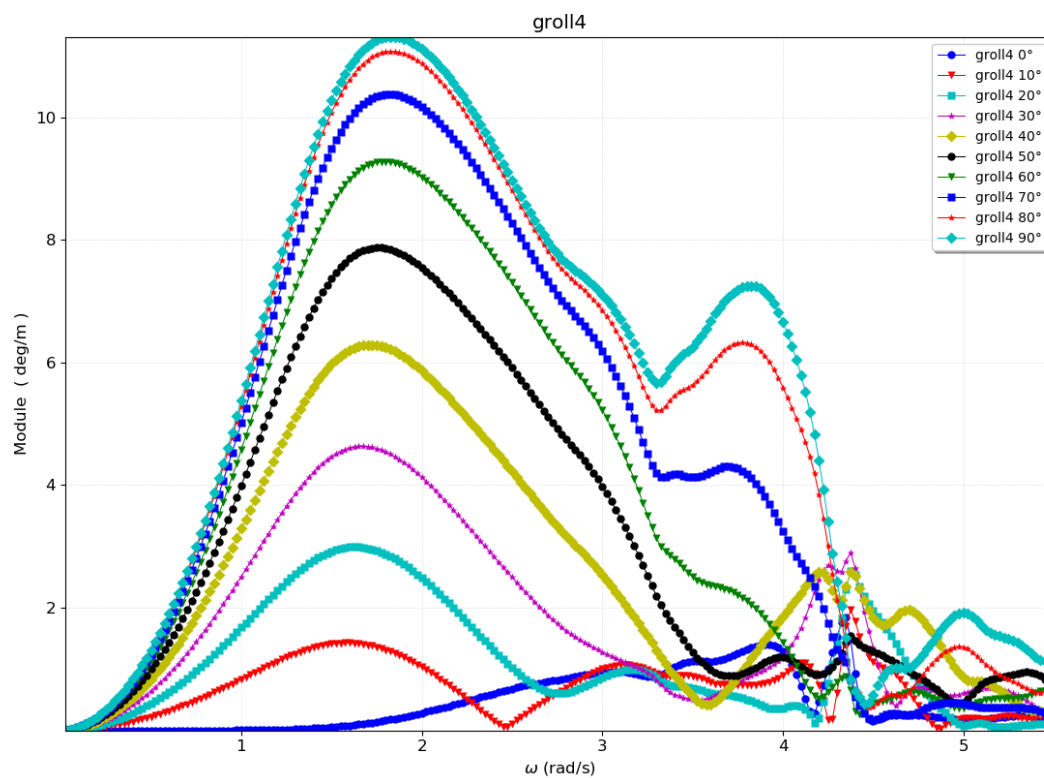
Slika I.10. Prijenosna funkcija ljuljanja pontona 1



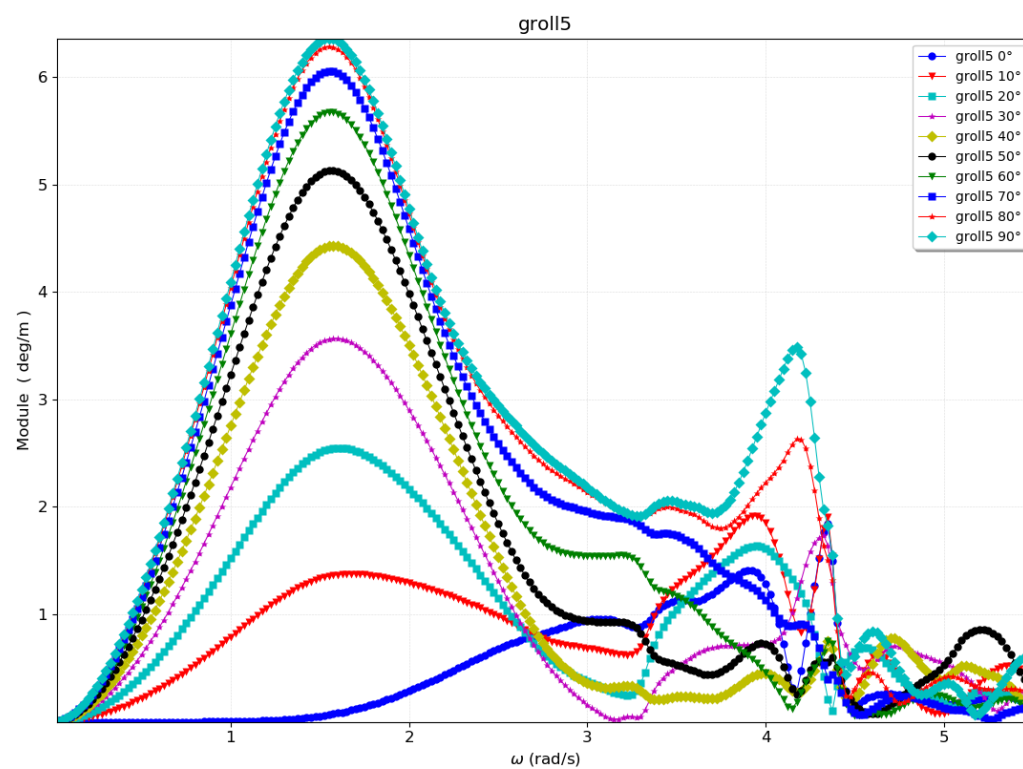
Slika I.11. Prijenosna funkcija ljuljanja pontona 2



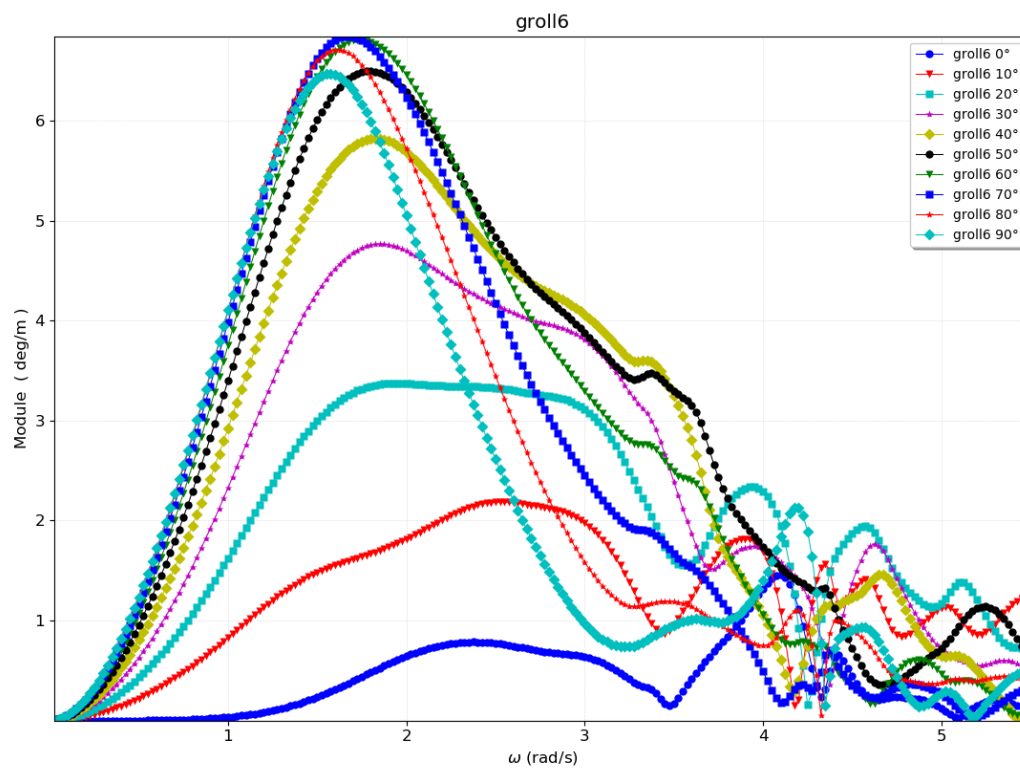
Slika I.12. Prijenosna funkcija ljuljanja pontona 3



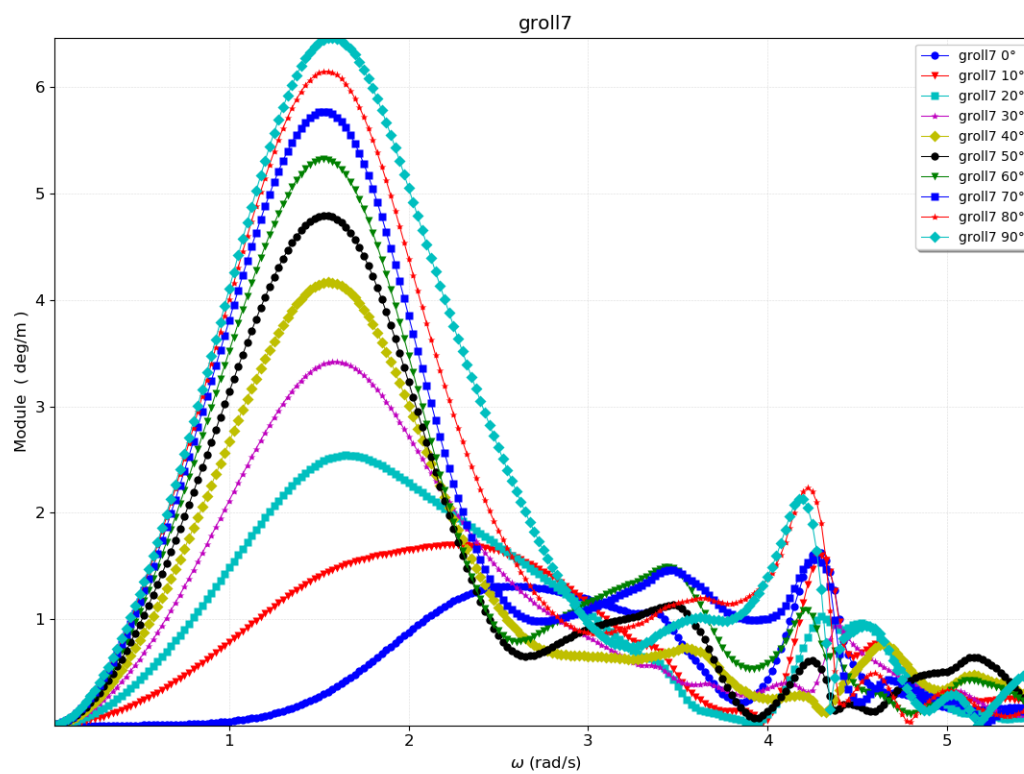
Slika I.13. Prijenosna funkcija ljuľanja pontona 4



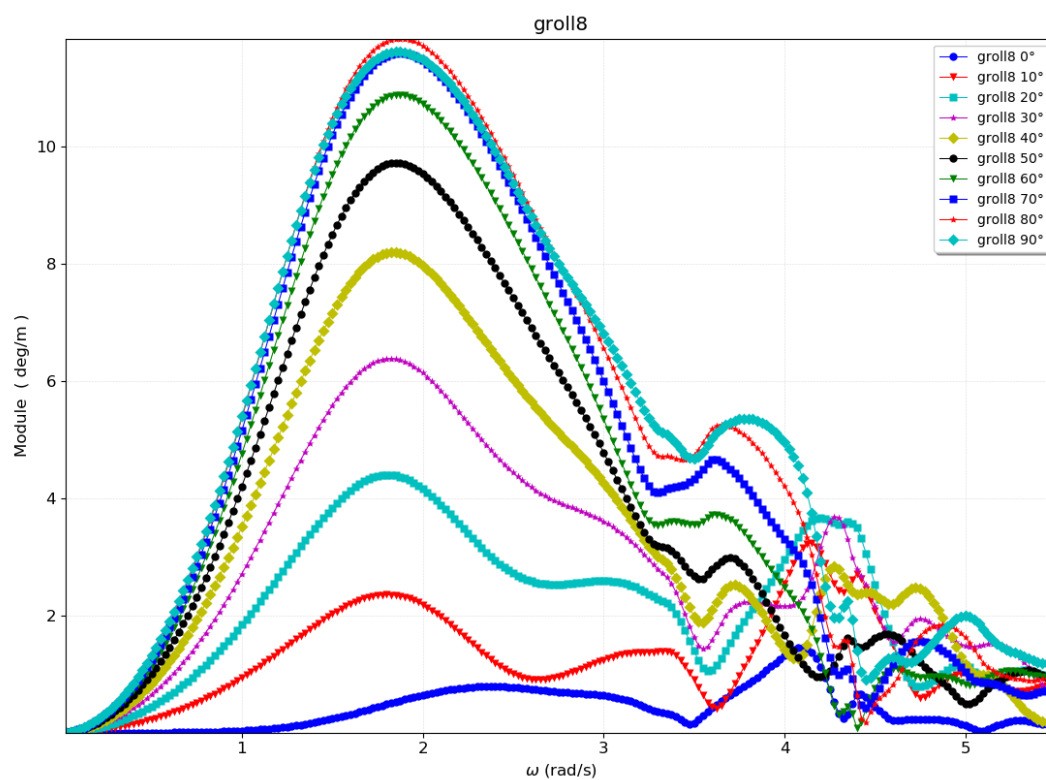
Slika I.14. Prijenosna funkcija ljuľanja pontona 5



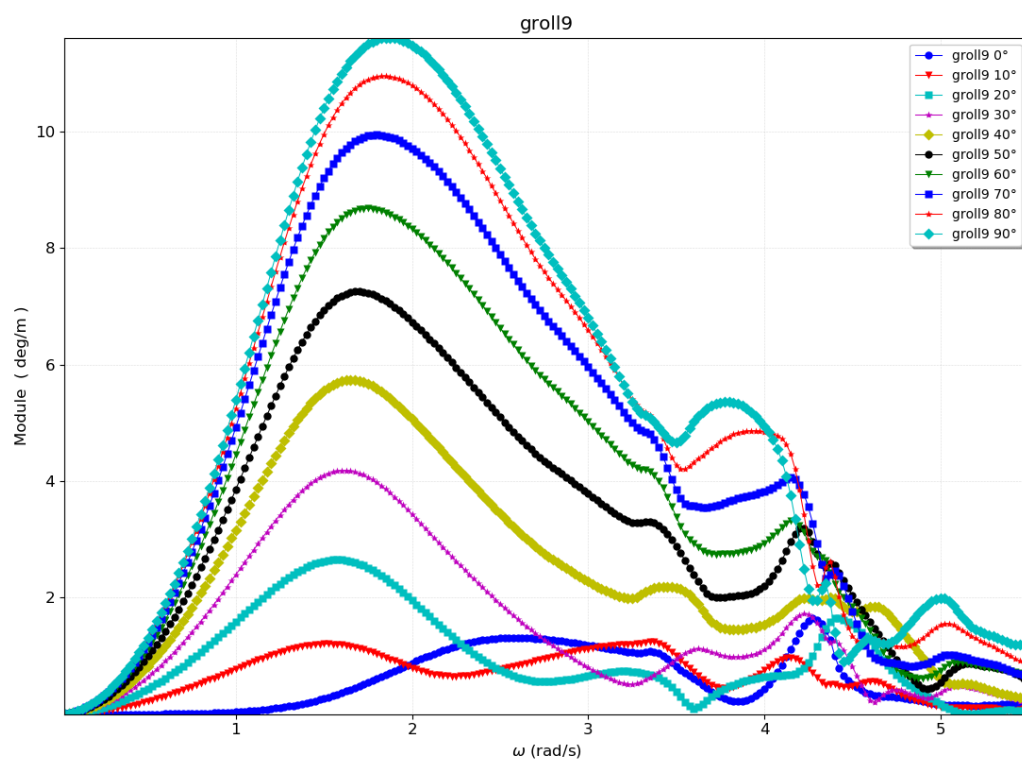
Slika I.15. Prijenosna funkcija ljuljanja pontona 6



Slika I.16. Prijenosna funkcija ljuljanja pontona 7



Slika I.17. Prijenosna funkcija ljuľanja pontona 8



Slika I.18. Prijenosna funkcija ljuľanja pontona 9