

# Numerička simulacija ljuľanja i prevrtanja blokova u priobalnim građevinama pod utjecajem seizmičke pobude podloge i valova

---

Cetin, Antonio

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:295362>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-28**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Antonio Cetin**

**Numerička simulacija ljuljanja i prevrtanja blokova u priobalnim  
građevinama pod utjecajem seizmičke pobude podloge i valova**

**Završni rad**

**Rijeka, 2022.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Preddiplomski Sveučilišni studij  
Mehanika II**

**Antonio Cetin  
JMBAG: 0114031172**

**Numerička simulacija ljuljanja i prevrtanja blokova u priobalnim  
građevinama pod utjecajem seizmičke pobude podloge i valova**

**Završni rad**

**Rijeka, lipanj 2022.**

## IZJAVA

Završni rad izradio sam samostalno, u suradnji s mentoricom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.



---

Antonio Cetin

U Rijeci, lipanj 2022.

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentorici prof.dr.sc. Nini Čeh na prenesenom znanju te pomoći prilikom izrade završnog rada.

## SAŽETAK

Ovim radom opisano je ponašanje modela vertikalnog lukobrana na koji djeluju sile hidrostatskog pritiska mora te gibanje podloge. Model je pojednostavljen kao vitki blok u ovom primjeru. Koristen je software Python u kojem je isprogramirano ponašanje valova te promjena sile i položaja kroz vrijeme. Konačna jednadžba prikazuje kut zaokreta kroz vrijeme (prve 3 sekunde djelovanja). Rezultati su prikazani za osnovne parametre, te kasnije za različite vrijednosti istih parametara.

Ključne riječi : model, hidrostatski pritisak, Python, jednadžba, kut zaokreta, osnovni parametri

## ABSTRACT

This paper describes the behavior of the vertical breakwater model, which is influenced by the forces of hydrostatic pressure of the sea and the motion of the substrate. The model is simplified as a slender block in this example. Python software was used, in which wave behavior and changes in force and position through time were programmed. The final equation shows the angle of rotation over time (the first 3 seconds of action). The results are presented for the basic parameters and later for different values of the same parameters.

Keywords : model, hydrostatic pressure, Python, equation, angle of rotation, basic parameters

## Sadržaj

1. UVOD .....	2
2. OPIS PROBLEMA .....	3
3. LJULJANJE BLOKOVA .....	5
3.1. Rotacija bloka oko točke A .....	5
4. MODELIRANJE UTJECAJA VALOVA .....	8
4.1. Gibanje mora .....	8
4.2. Nastajanje vjetrovnih valova .....	9
4.3. Mehanika valova .....	10
4.4. Proračun dijagrama opterećenja ispod vala .....	13
5. LJULJANJE BLOKA URONJENOG U VODU .....	14
5.1. Jednadžba ljuljanja bloka .....	14
5.2. Linearizacija jednadžbe .....	15
5.3. Određivanje konačne jednadžbe .....	17
6. REZULTATI I DISKUSIJA .....	19
6.1. Osnovni parametri .....	19
6.2. Ponašanje pri različitim ubrzanjima podloge .....	22
6.3. Ponašanje pri različitim frekvencijama .....	25
6.4. Rezultati kod drukčije dubine mora .....	28
6.5. Rezultati pri promjeni periode vala .....	33
6.6. Rezultati pri promjeni visine vala .....	38
7. ZAKLJUČAK .....	45
8. LITERATURA .....	46
9. PRILOZI .....	47



## POPIS SLIKA

**Slika 1.** skica modela

**Slika 2.** DMA dijagram

**Slika 3.** DST dijagram

**Slika 4.** glavne morske struje

**Slika 5.** kretanje vjetra na sjevernoj zemaljskoj polukugli

**Slika 6.** poprečni presjek rasprostiranja vala

**Slika 7.** prikaz područja gibanja valova s obzirom na dubinu mora

**Slika 8.** valni parametri prema linearnoj teoriji valova

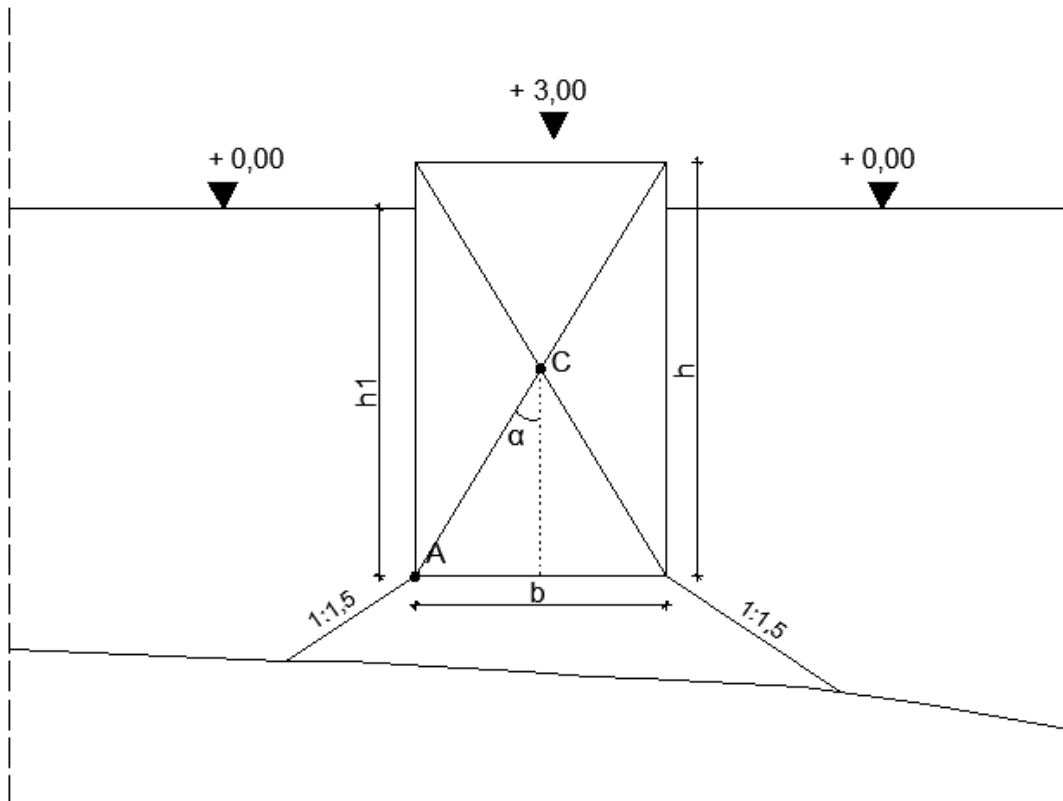
# 1.UVOD

Priobalne građevine još od samih početaka civilizacija gradile su se uz veliki oprez te detaljne i složene proračune. Tu čast imali su samo najbolji i najiskusniji graditelji toga doba. U doba antičke Grčke štovali su snagu mora te njegovih valova. Kako su se na kopnu počele graditi razne potporne građevine za očuvanje stabilnosti padina ili radi prometnica, tako su se u priobalju počele raditi građevine u moru. Na priobalne građevine naravno ne utječe samo more, već i seizmički procesi, gravitacija te razno razni faktori.

U ovom radu pokušati će se objasniti utjecaj mora, valova te seizmičkih pobuda podloge na pojednostavljeni model vertikalnog lukobrana. Za rješavanje problemskog zadatka korišteni su softwari : Spyder, Autocad, Github te Mendeley. U poglavlju 2 prikazana je skica modela, te objašnjen problemski zadatak, potom se provodi proračun djelovanja mora i ljujanja bloka. U 4. poglavlju opisano je gibanje mora te mehanika valova. U 5. poglavlju prikazana je jednadžba ljujanja bloka te se provodi linearizacija jednadžbe. U konačnici dobivena je jednadžba za kut zaokreta koja ovisi o parametrima valova te gibanja podloge. U poglavlju 6 prikazani su rezultati za različite parametre te prokomentirano njihovo djelovanje na vertikalni lukobran. U 7. poglavlju doneseni su zaključci te u narednim poglavljima nalazi se literatura te python kod koji je korišten u ovom radu.

## 2. OPIS PROBLEMA

Zadatak ljuhanja i prevrtanja blokova simuliran je pojednostavljenim primjerom vertikalnog lukobrana opterećenog različitim sila i momentima.. Model je zamišljen kao vertikalni lukobran dimenzija 10 x 5 metara prikazan na slici 1. Dubina vode je 7 metara, dok je visina vala 1 metar. Pretpostavlja se da val djeluje s jedne strane, dok je s druge strane mirna razina vode te je prisutan samo hidrostatski tlak. Na model djeluje i uzgon.



Slika 1 – skica modela

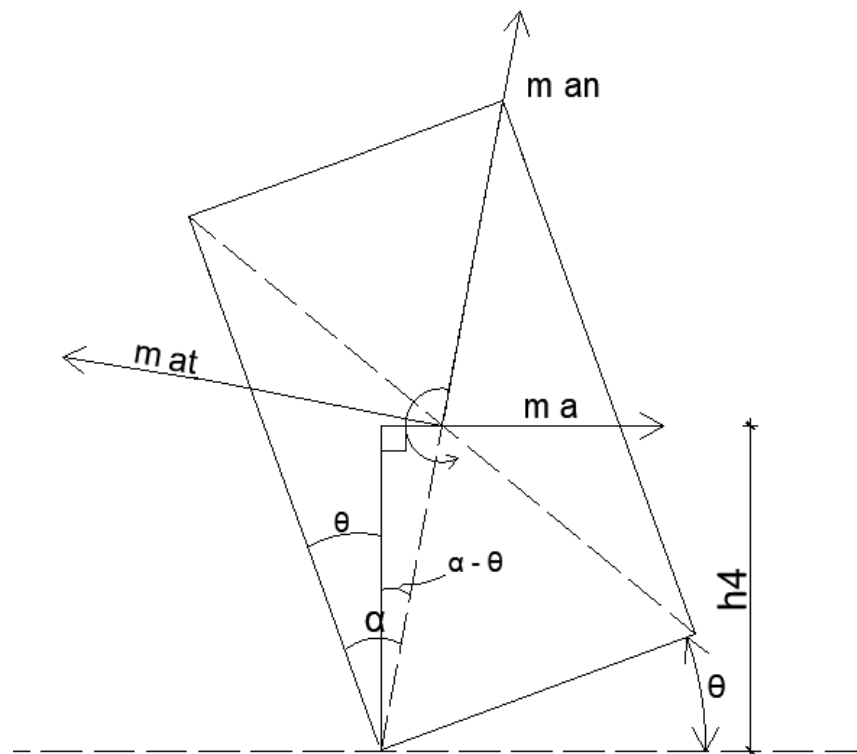
Na slici 1 je:

- $b$  - širina modela,  $b = 5$  m,
- $h$  - visina modela,  $h = 10$  m,
- $h_1$  - visina uronjenog dijela modela = 7 m,
- nagib nasipa ( $h/l$ ) = 1:1,5

### 3. LJULJANJE BLOKOVA

#### 3.1. Rotacija bloka oko točke A

DMA

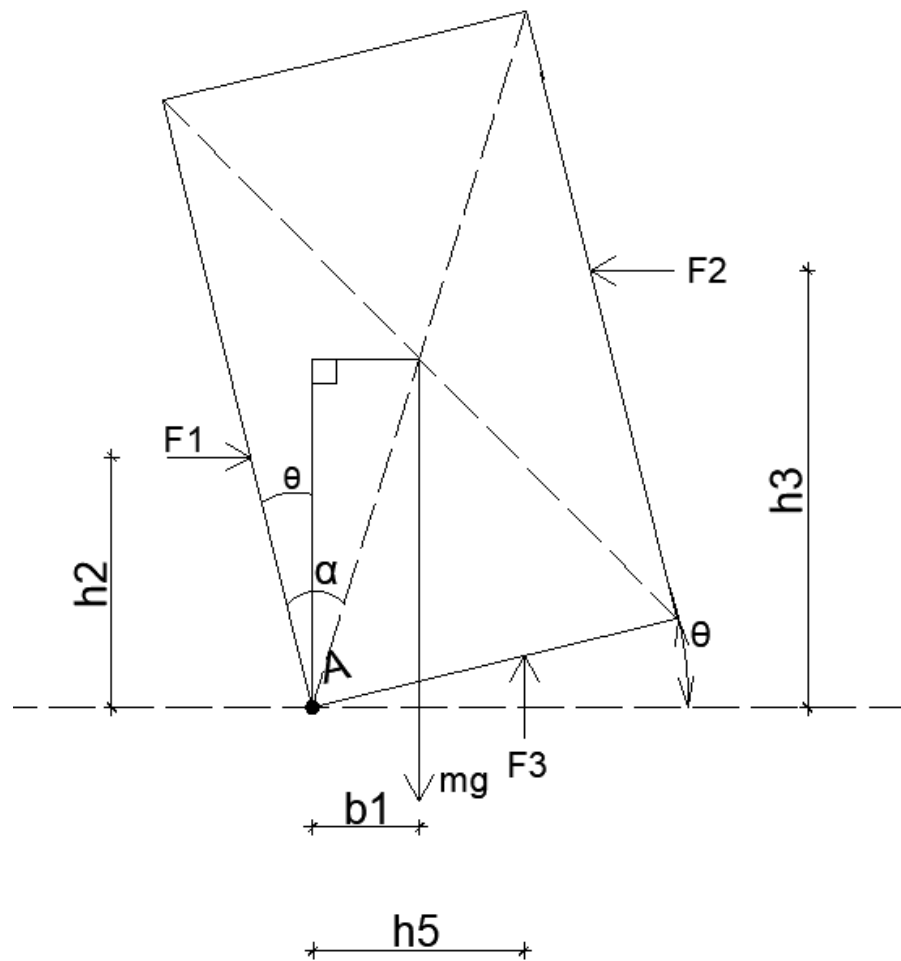


Slika 2 - DMA dijagram

Na slici 2 je:

- DMA – dijagram mase i ubrzanja
- $m a$  – masa pomnožena s ubrzanjem
- $m a_t$  – masa pomnožena s tangencijalnih ubrzanjem
- $m a_n$  – masa pomnožena s normalnim ubrzanjem

# DST



Slika 3 - DST dijagram

Na slici 3 je:

- DST – dijagram slobodnog tijela
- $F_1, F_2, F_3$  – hidrostatske sile nastale djelovanjem mora
- $h_2, h_3, h_5$  – udaljenosti sila od težista

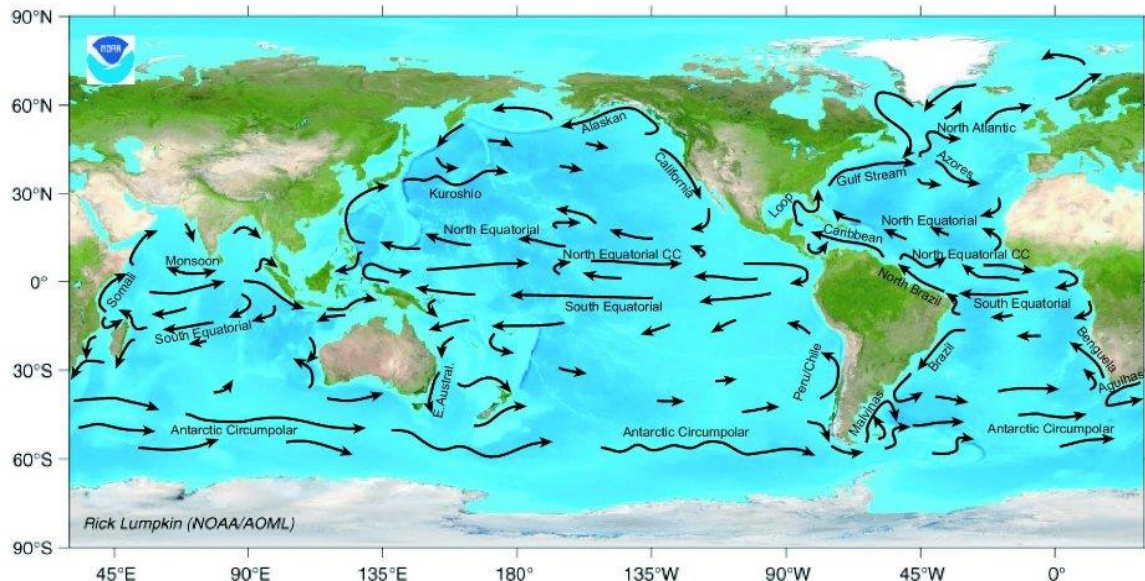
Na skici modela određena je točka rotacije (A) s obzirom na koju su raspisane jednačbe. Na model djeluju sile hidrostatskog pritiska te sile uzgona. To je opisano pomoću dijagrama slobodnog tijela, dok je pomoću dijagrama mase i ubrzanja prikazano normalno, tangencijalno te ubzanje podloge na kojoj se blok nalazi. Izjednačavanjem te dvije jednačbe prema 2.Newtonovom zakonu dobivena je glavna jednačba kretanja koja opisuje naš model. Pretpostavljeno je da je kut rotacije ( $\theta$ ) vrlo mali i da je ( $\alpha$ ) maleni kut, odnosno da se radi o vitkom bloku koji ima malene rotacije te je provedena linearizacija jednačbe. Idući korak u rješavanju problema je zapisivanje jednačbe u kojoj je jedina nepoznanica ( $\theta_t$ ) za trenutak t. Na slici 2 prikazan je dijagram mase i ubrzanja, a na slici 3 dijagram slobodnog tijela.

## 4. MODELIRANJE UTJECAJA VALOVA

### 4.1. Gibanje mora

Gibanje mora ili pojednostavljeno pomorska hidraulika ima veliki utjecaja na dimenzioniranje i projektiranje pomorskih građevina. Hidraulika, kao znanost koja proučava kretanje realne tekućine i zakone ravnoteže, može se podijeliti u 2 kategorije: hidrostatika ( bavi se silama u tekućinama koje miruju) i hidrodinamika ( bavi se gibanjem tekućine). Dvije osnovne vrste gibanja mora : morske struje ( velika masa, ali mala brzina) i morski valovi ( mala masa, ali velika brzina).

Morske struje uzrokuje rotacija Zemlje, vjetrovi koji su dominantni na tom području, privlačna sila Mjeseca, razlika u salinitetu i još mnogi faktori. Na slici 4 prikazane su glavne morske struje. U Jadranskom moru djeluje sustav sredozemnih morskih struja. Zbog Zemljine rotacije se kreću suprotno kretanju kazaljke sata. Geografski položaj Jadranskog mora sprječava dolazak velikih masa vode, pa je tako i njegov utjecaj mali. Pogodan je i smjer kretanja struja, koje se kreću uz našu obalu od juga do sjevera i potom prema talijanskoj obali. To uvelike doprinosi čistoći Jadranskog mora.

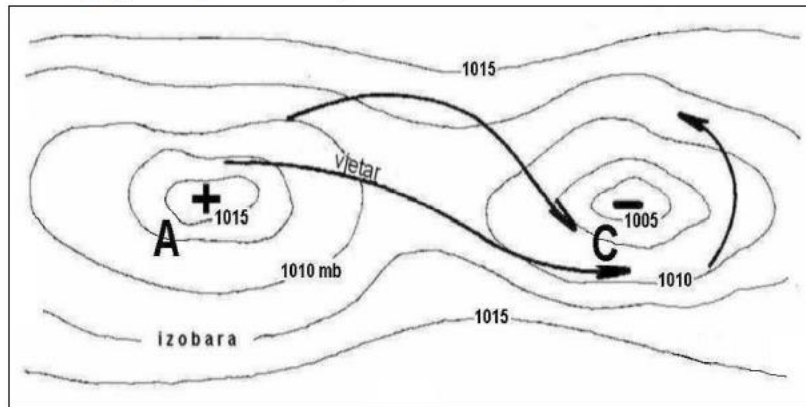


Slika 4 – glavne morske struje



## 4.2. Nastajanje vjetrovnih valova

Vjetar je horizontalno gibanje zraka kao posljedica razlike tlaka zraka. Zrak struji s područja polja visokog tlaka zraka (A – anticiklona) prema polju niskog tlaka zraka (C-ciklona). Gibanje zraka na sjevernoj hemisferi prikazano je na slici 5. Povećanjem brzine strujanja zraka jača Coriolisova sila koja otklanja smjer strujanja zraka. Svi ti čimbenici uzrokuju kružno strujanje zraka. Brzina vjetra mjeri se anemometrom. U Hrvatskoj na području Jadrana najznačajna je bura (sjeveroistočni vjetar) te jugo (južni vjetar) koji uzrokuje velike probleme pomorskim građevinama. Od lokalnih vjetrova u Kvarneru pušu još i tramontana (sjeverni vjetar u rano jutarnjim satima na području Preluka i Voloskog) te maestral (sjevero zapadni vjetar u popodnevnim satima).

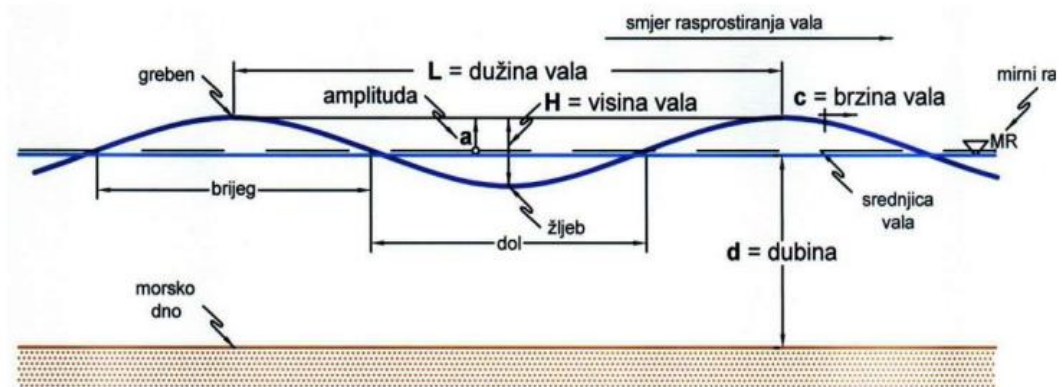


Slika 5 – Kretanje vjetra na sjevernoj zemaljskoj polukugli od područja visokog tlaka zraka (A) ka području niskog tlaka zraka

### 4.3. Mehanika valova

Morski valovi su posljedica vjetrova, brodova te seizmičkih gibanja i tektonskih poremećaja. Poprečni presjek vala (prikazan na slici 6) se sastoji od brijega i dola, odnosno najizbočenijih dijelova : grebena i žljeba. Valove opisujemo sljedećim parametrima:

- $H$  – visina vala (m)
- $T$  – valni period (s)
- $L$  – duljina vala (m)
- $H/L$  – strmost vala

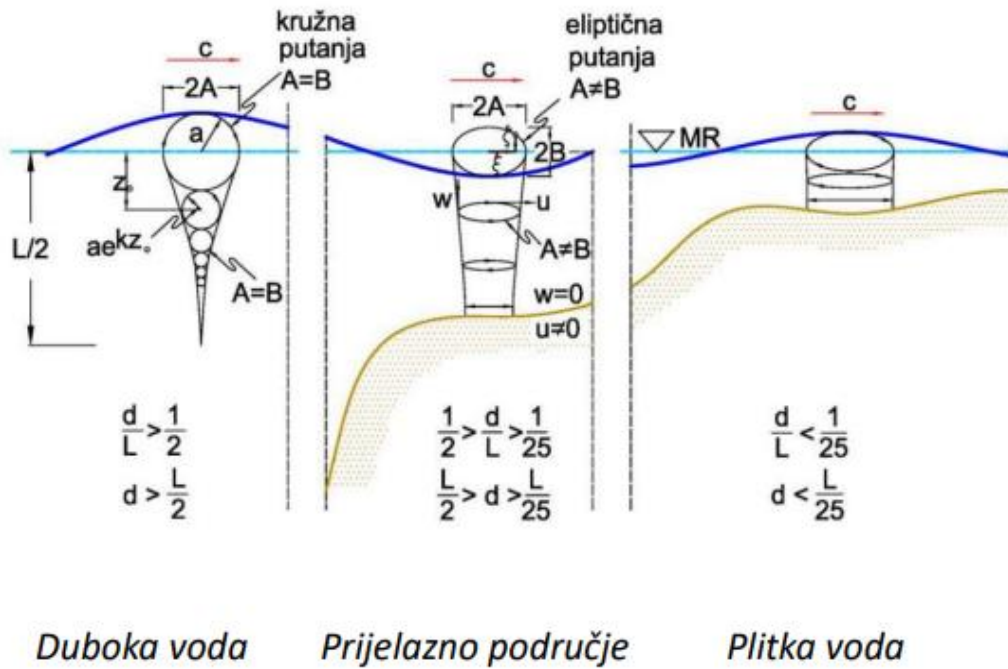


Slika 6 – poprečni presjek rasprostiranja vala

Za računanje parametara valova malih amplituda koristi se teorija valova malih amplitude, za malu strmost vala ( $H/L < 1/150$ ). Pa tako razlikujemo 3 područja (prikazana na slici 7)

:

- Duboka voda ( $d > L/2$ )
- Prijelazno područje ( $L/2 > d > L/25$ )
- Plitka voda ( $d < L/25$ )



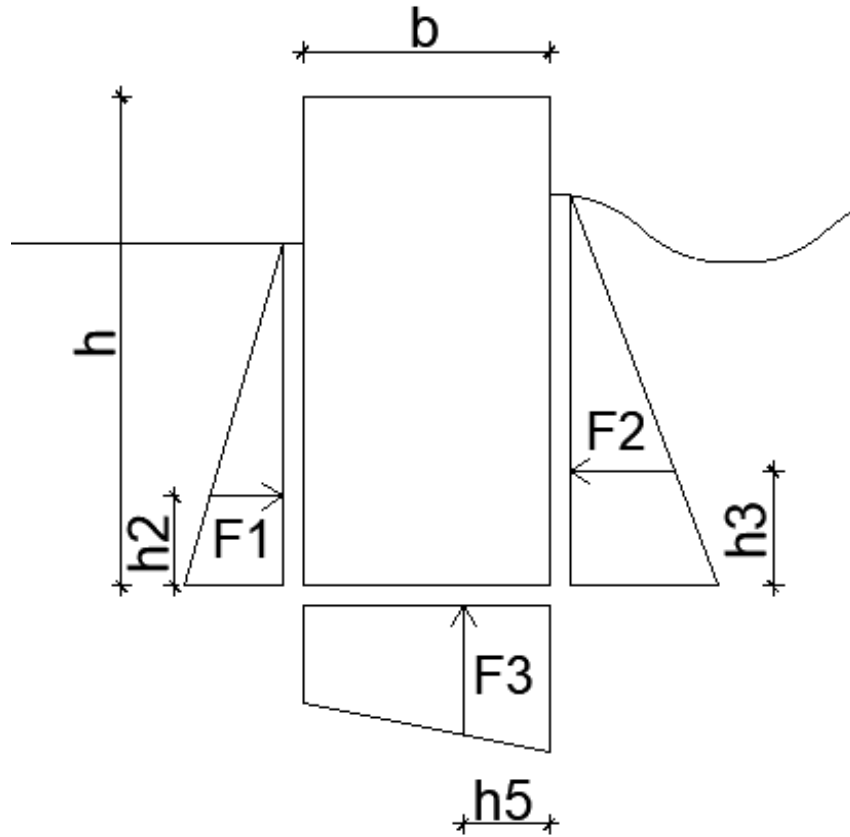
Slika 7 – prikaz područja gibanja valova s obzirom na dubinu mora

Proračun vala provodi se prvo određujući relativnu dubinu, kada se odredi relativna dubina, tada se računa dužina vala ( $L$ ) koja ovisi o periodu vala ( $T$ ) te gravitaciji ( $g$ ), sa dobivenom dužinom vala ( $L$ ) možemo izračunati brzinu vala ( $C$ ) koja ovisi o dužini vala ( $L$ ) i periodu vala ( $T$ ), za naš model potrebno je izračunati još i pritisak uzrokovan hidrostatskim silama ( $p$ ). Formule za proračun parametara vala prikazana su na slici 8.

Relativna dubina	Duboka voda $\frac{d}{L} > \frac{1}{2}$	Prijelazno područje $\frac{1}{25} < \frac{d}{L} < \frac{1}{2}$	Plitka voda $\frac{d}{L} < \frac{1}{25}$
1. Profil vala	isto	$\eta = \frac{H}{2} \cos \left[ \frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T} \right] = \frac{H}{2} \cos \Theta$	isto
2. Brzina vala	$C = C_0 = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi} = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}}$	$C = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi} \tanh \left( \frac{2\pi d}{L} \right) = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L}}$	$C = \frac{L}{T} = \sqrt{gd}$
3. Dužina vala	$L = L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} = C_0 T, T = \sqrt{\frac{2\pi L}{g}}$	$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \left( \frac{2\pi d}{L} \right)$	$L = T \sqrt{gd} = CT$
4. Brzina grupe valova	$C_g = \frac{1}{2} C = \frac{gT}{4\pi}$	$C_g = nC = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{4\pi \frac{d}{L}}{\sinh(4\pi \frac{d}{L})} \right] \times C$	$C_g = C = \sqrt{gd}$
5. Brzina čestica a) Horiz. b) Vert.	$u = \frac{\pi H}{T} e^{-\frac{2\pi z}{L}} \times \cos \Theta$ $w = \frac{\pi H}{T} e^{-\frac{2\pi z}{L}} \times \sin \Theta$	$u = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh \left[ \frac{2\pi(z+d)}{L} \right]}{\cosh(2\pi d/L)} \times \cos \Theta$ $w = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\sinh \left[ \frac{2\pi(z+d)}{L} \right]}{\cosh(2\pi d/L)} \times \sin \Theta$	$u = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{d}} \cos \Theta$ $w = \frac{H\pi}{T} \left( 1 + \frac{z}{d} \right) \sin \Theta$
9. Pritisak ispod vala	$p = \rho g \eta e^{-\frac{2\pi z}{L}} - \rho g z$	$p = \rho g \eta \frac{\cosh \left[ \frac{2\pi(z+d)}{L} \right]}{\cosh(2\pi d/L)} - \rho g z$	$p = \rho g (\eta - z)$

Slika 8 – valni parametri prema linearnoj teoriji valova

#### 4.4. Proračun dijagrama opterećenja ispod vala



$$H = 1 \text{ m}$$

$$T = 4 \text{ s}$$

$$d = 7 \text{ m}$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} = \frac{9,81 \cdot 4^2}{2\pi} = 24,98 \text{ m}$$

$$\frac{d}{L} = 0,28 \rightarrow \text{Prijelazno područje}$$

## 5. LJULJANJE BLOKA URONJENOG U VODU

### 5.1. Jednadžba ljuljanja bloka

Iz sume momenata oko točke A dobivamo 2 jednadžbe za dijagram slobodnog tijela (DST) i dijagram mase i ubrzanja (DMA).

$$\Sigma M_A = F_1 * h_2 + m * g * R * \sin(\alpha - \theta_t) - F_2 * h_3 - F_3 * h_5 \quad (1)$$

$$\Sigma M_A = -I_C * \ddot{\theta} - m * a * R * \cos(\alpha - \theta_t) - m * a_t * R \quad (2)$$

Gdje su:

- $F_1, F_2, F_3$  – hidrostatske sile,
- $h_2, h_3, h_4, h_5$  – krakovi na kojima djeluju sile,
- $m$  – masa bloka,
- $g$  – gravitacija,
- $a$  – ubrzanje,
- $R$  – radijus,
- $I$  – inercija.

Izjednačavanjem DMA i DST jednadžbi dobiven je sljedeći izraz:

$$F_1 * h_2 + m * g * R * \sin(\alpha - \theta_t) - F_2 * h_3 - F_3 * h_5 = -I_C * \ddot{\theta} - m * a * R * \cos(\alpha - \theta_t) - R * \ddot{\theta} \quad (3)$$

## 5.2. Linearizacija jednadžbe

Pomoću funkcije razlike kutova rastavljeni su sljedeći izrazi:

$$R * \sin (\alpha - \theta) = R * (\sin \alpha * \cos \theta - \cos \alpha * \sin \theta) \quad (4)$$

$$R * \cos (\alpha - \theta) = R * (\cos \alpha * \cos \theta + \sin \alpha * \sin \theta) \quad (5)$$

Pretpostavkom da je kut rotacije theta ( $\theta$ ) jako malen dobiveno je:

$$\theta \rightarrow 0 \rightarrow \cos \theta = 1, \sin \theta = \theta \quad (6)$$

Uvrštavanjem dobivenih vrijednosti (6) u izraze (4) i (5) jednadžbe poprimaju oblik :

$$R * (\sin \alpha - \cos \alpha * \theta) \quad (7)$$

$$R * (\cos \alpha + \sin \alpha * \theta) \quad (8)$$

Sličan postupak provodi se i za  $\alpha \rightarrow 0$ , zbog toga što je model vitki blok

$$\alpha \rightarrow 0 \rightarrow \cos \alpha = 1, \sin \alpha = \alpha \quad (9)$$

Uvrštavanjem dobivenih vrijednosti (6) i (9) u jednažbe (4) i (5), izrazi poprimaju prilično jednostavne oblike:

$$R * (\alpha - \theta) = R * \sin(\alpha - \theta) \quad (10)$$

$$R * (1 + \alpha * \theta) = R = R * \cos(\alpha - \theta) \quad (11)$$

Budući da  $\alpha * \theta$  predstavlja umnožak dva malena kuta njihov produkt je zanemarivo malen



### 5.3. Određivanje konačne jednačbe

Konačno, uvrštavanjem pojednostavljenih izraza dobivamo jednačbu za ljuľanje blokova koja ovisi o kutnom ubrzanju ( $\ddot{\theta}_t$ )

$$F_1 * h_2 + m * g * R * (\alpha - \theta_t) - F_2 * h_3 - F_3 * h_5 = -I_C * \ddot{\theta} - m * a * R - m * R^2 * \ddot{\theta}_t \quad (12)$$

Odnosno :

$$\ddot{\theta}_t * (-I_C - m * R^2) = F_1 * h_2 + m * g * R * (\alpha - \theta_t) - F_2 * h_3 - F_3 * h_5 + m * a * R \quad (13)$$

$$\ddot{\theta}_t = \frac{F_1 * h_2 + m * g * R * (\alpha - \theta_t) - F_2 * h_3 - F_3 * h_5 + m * a * R}{-I_C - m * R^2} \quad (14)$$

Budući da nam je kutno ubzanje ( $\ddot{\theta}_t$ ) nepoznato, njega računamo tako da znamo sve parametre iz prethodnog trenutka, pa tako izraz za ( $\ddot{\theta}_t$ ) glasi:

$$\ddot{\theta}_t = \frac{\theta_t - \Delta t * \dot{\theta}_{t-1} - \left(\frac{1}{2} - \beta\right) * \Delta t^2 * \ddot{\theta}_{t-1}}{\beta * \Delta t^2} \quad (15)$$

Uvrštavanjem funkcije  $\ddot{\theta}_t$  u jednadžbu za ljuljanje blokova dobiven je izraz bez kutnog ubrzanja:

$$\frac{F_1 * h_2 + m * g * R * (\alpha - \theta_t) - F_2 * h_3 - F_3 * h_5 + m * a * R}{-I_C - m * R^2} = \frac{\theta_t - \Delta t * \dot{\theta}_{t-1} - \left(\frac{1}{2} - \beta\right) * \Delta t^2 * \ddot{\theta}_{t-1}}{\beta * \Delta t^2} \quad (16)$$

Iz izraza (16) rješavanjem jednadžbe izlučen je kut rotacije theta t ( $\theta_t$ ):

$$\begin{aligned} & (F_1 * h_2 + m * g * R * (\alpha - \theta_t) - F_2 * h_3 - F_3 * h_5 + m * a * R) * \beta * \Delta t^2 \\ & = \left( \theta_t - \Delta t * \dot{\theta}_{t-1} - \left(\frac{1}{2} - \beta\right) * \Delta t^2 * \ddot{\theta}_{t-1} \right) * (-I_C - m * R^2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (F_1 * h_2 + m * g * R * \alpha - F_2 * h_3 - F_3 * h_5 + m * a * R) * \beta * \Delta t^2 - \left( -\Delta t * \dot{\theta}_{t-1} - \left(\frac{1}{2} - \beta\right) * \Delta t^2 * \ddot{\theta}_{t-1} \right) * (-I_C - m * R^2) \\ & = m * g * R * \theta_t * \beta * \Delta t^2 + \theta_t * (-I_C - m * R^2) \end{aligned}$$

$$\theta_t * (m * g * R * \beta * \Delta t^2 - m * R^2 - I_C)$$

$$= (F_1 * h_2 + m * g * R * \alpha - F_2 * h_3 - F_3 * h_5 + m * a * R) * \beta * \Delta t^2 - \left( -\Delta t * \dot{\theta}_{t-1} - \left(\frac{1}{2} - \beta\right) * \Delta t^2 * \ddot{\theta}_{t-1} \right) * (-I_C - m * R^2)$$

$$\theta_t = \frac{(F_1 * h_2 + m * g * R * \alpha - F_2 * h_3 - F_3 * h_5 + m * a * R) * \beta * \Delta t^2 - \left( -\Delta t * \dot{\theta}_{t-1} - \left(\frac{1}{2} - \beta\right) * \Delta t^2 * \ddot{\theta}_{t-1} \right) * (-I_C - m * R^2)}{(m * g * R * \beta * \Delta t^2 - m * R^2 - I_C)}$$

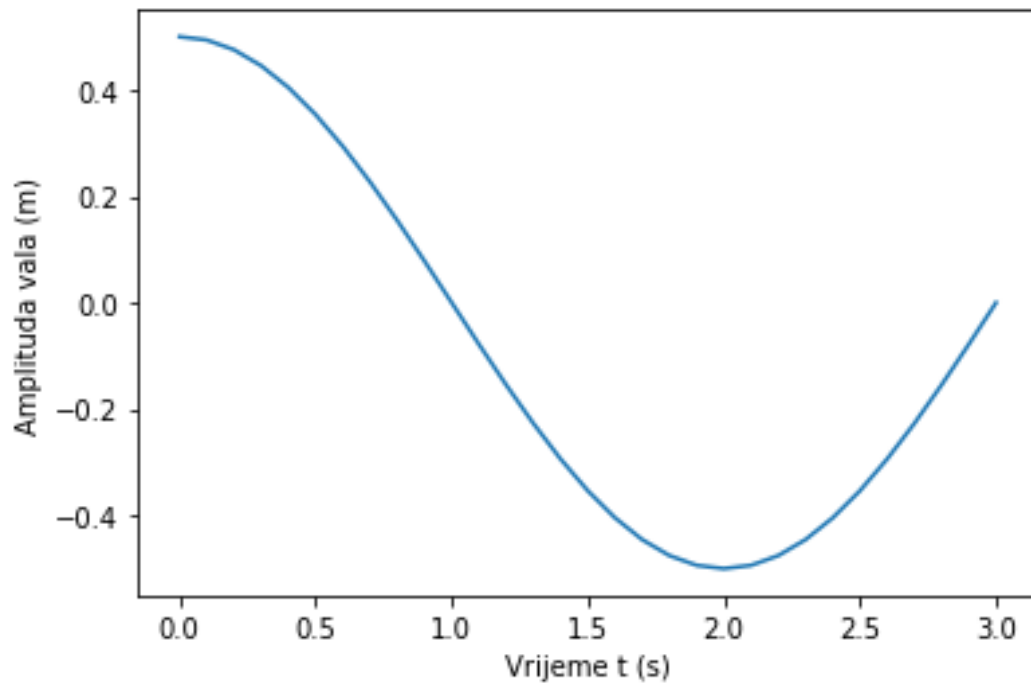
Vrijednosti  $F_1$ ,  $F_2$  i  $F_3$  ovise o trenutnoj razini vode i parametrima vala (amplitudi i periodu vala). Ubrzanje (a) ovisi o kretanju podloge. Jedina nepoznanica je kut rotacije theta t ( $\theta_t$ ), koju izračunamo tako da imamo sve vrijednosti iz prethodnog trenutka ( $\theta_{t-1}$ ).

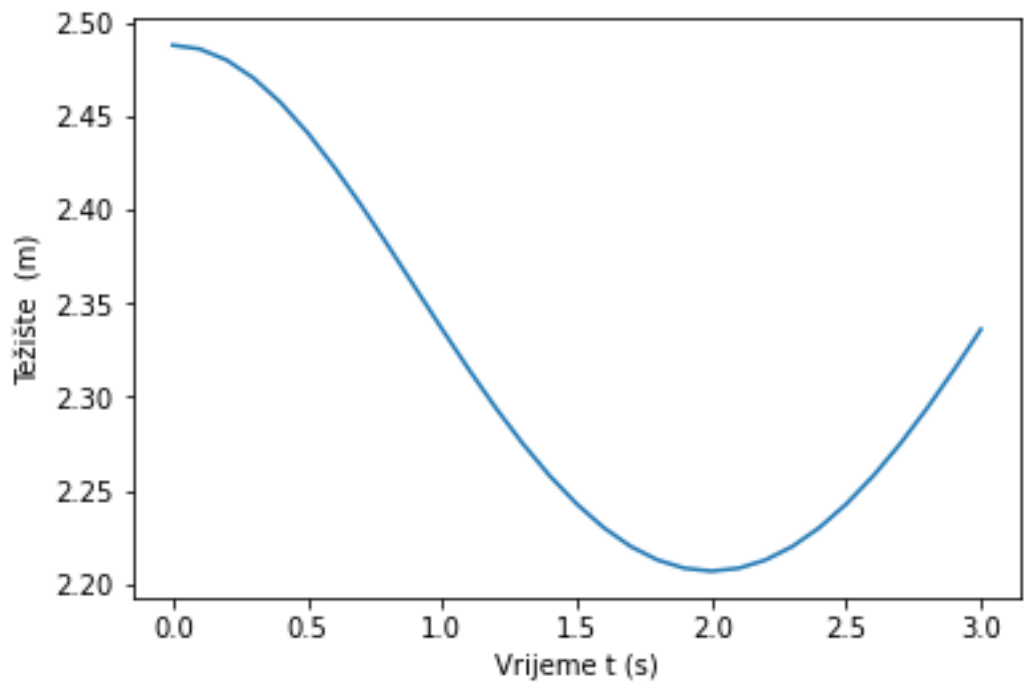
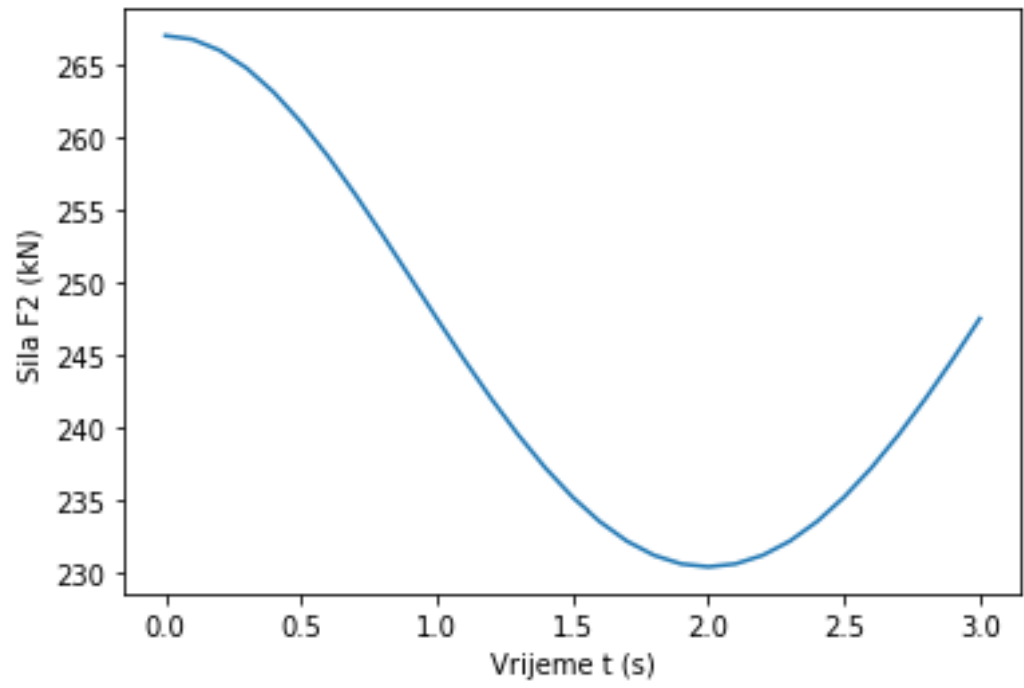
## 6. REZULTATI I DISKUSIJA

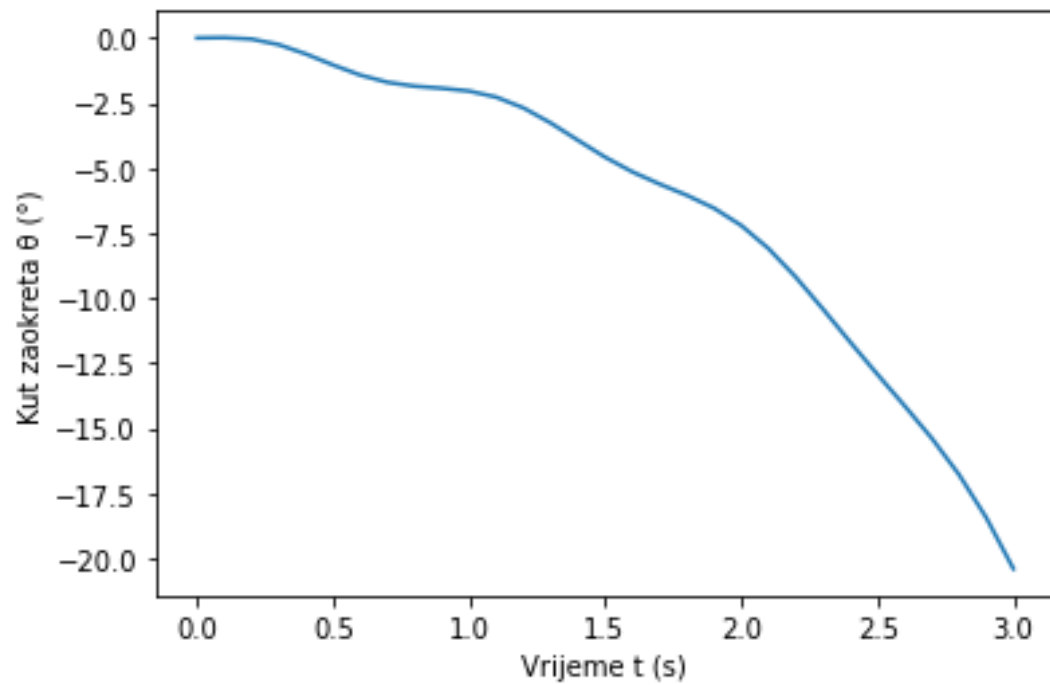
U ovom poglavlju prikazati će se rezultati. Prikazuje se promjena vrijednosti parametara kroz vrijeme. Određeno vrijeme promatranja su prve 3 sekunde. Prikazana je promjena amplitude vala, sile te težišta sile  $F_2$  i promjena kuta zaokreta vertikalnog lukobrana.

### 6.1. Osnovni parametri

Za osnovne parametre dobiveni su slijedeći rezultati:

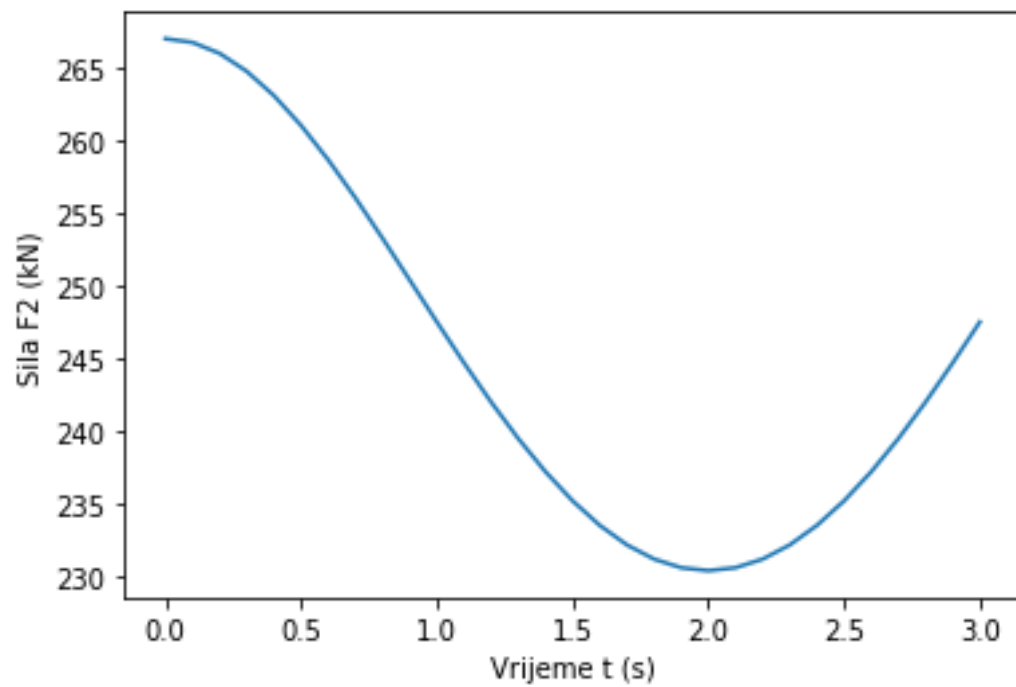
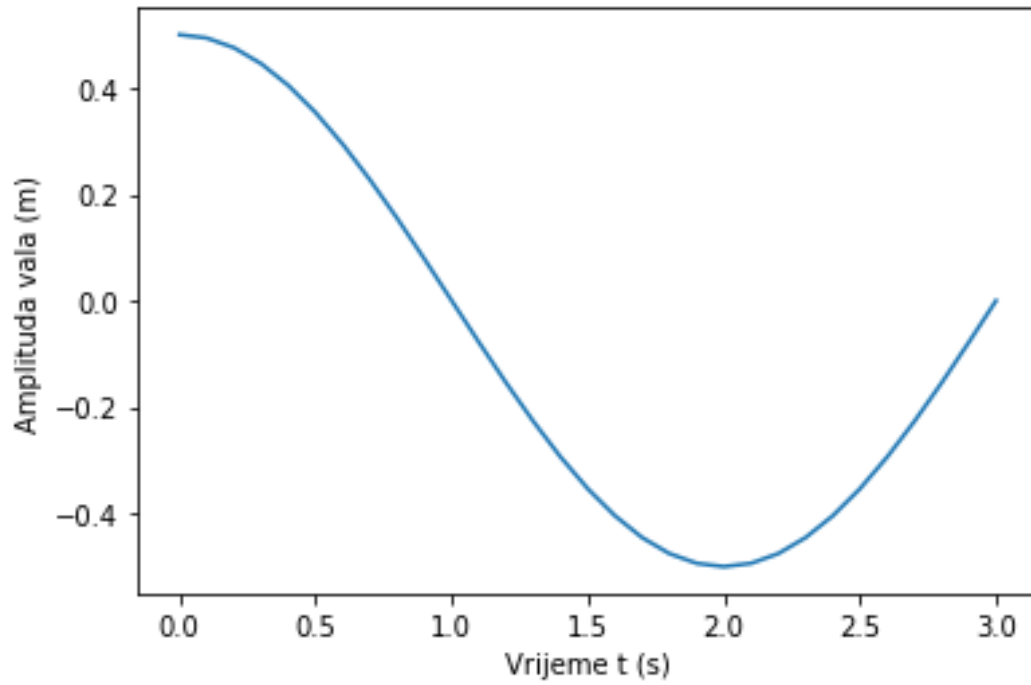


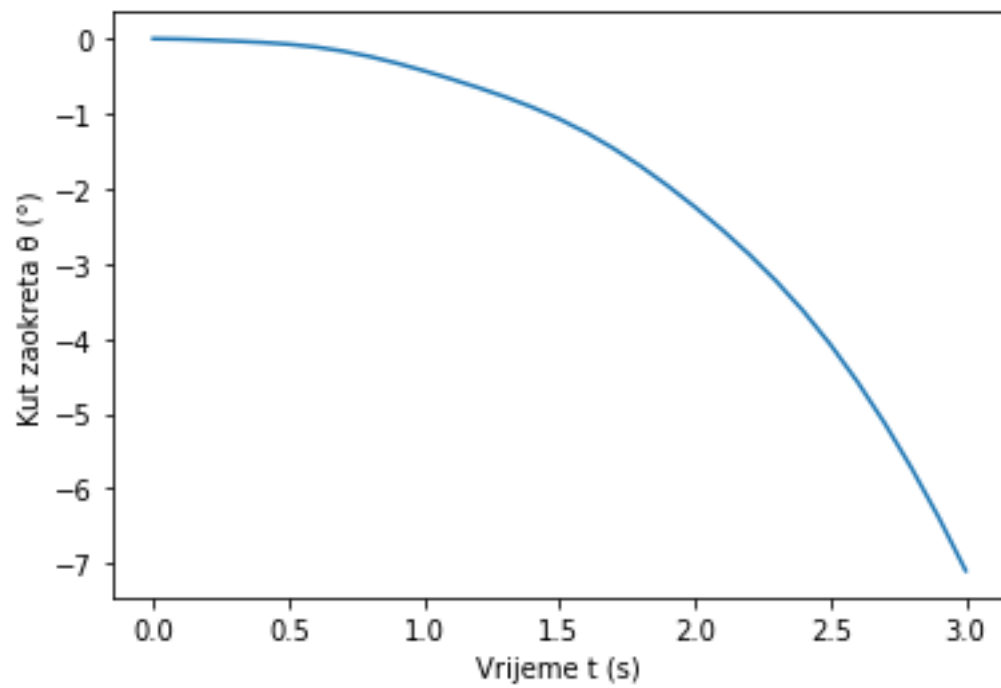
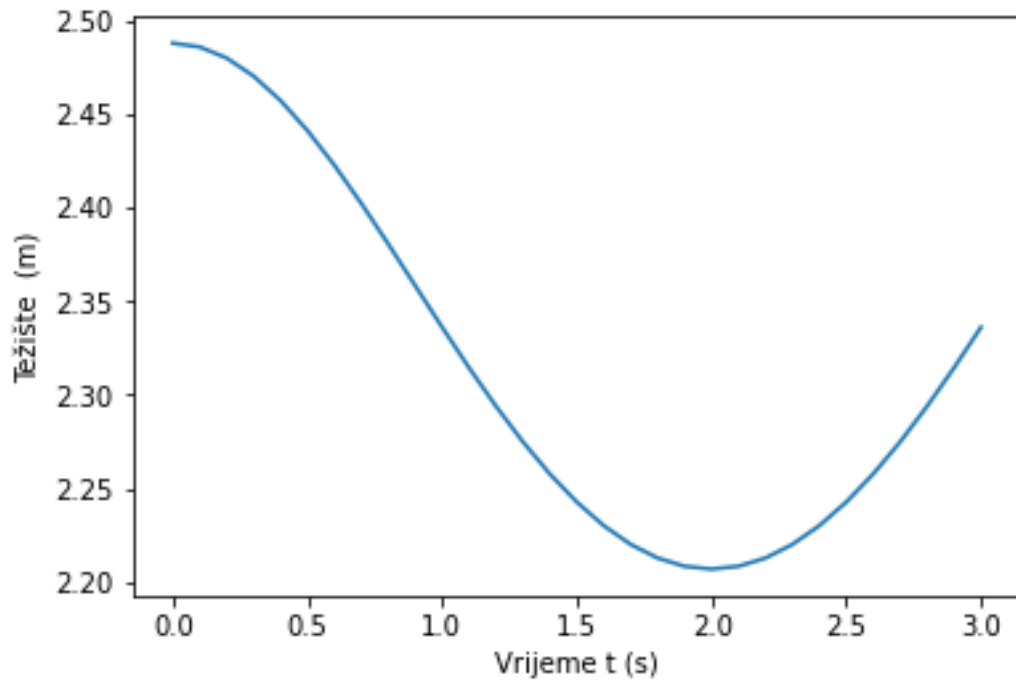




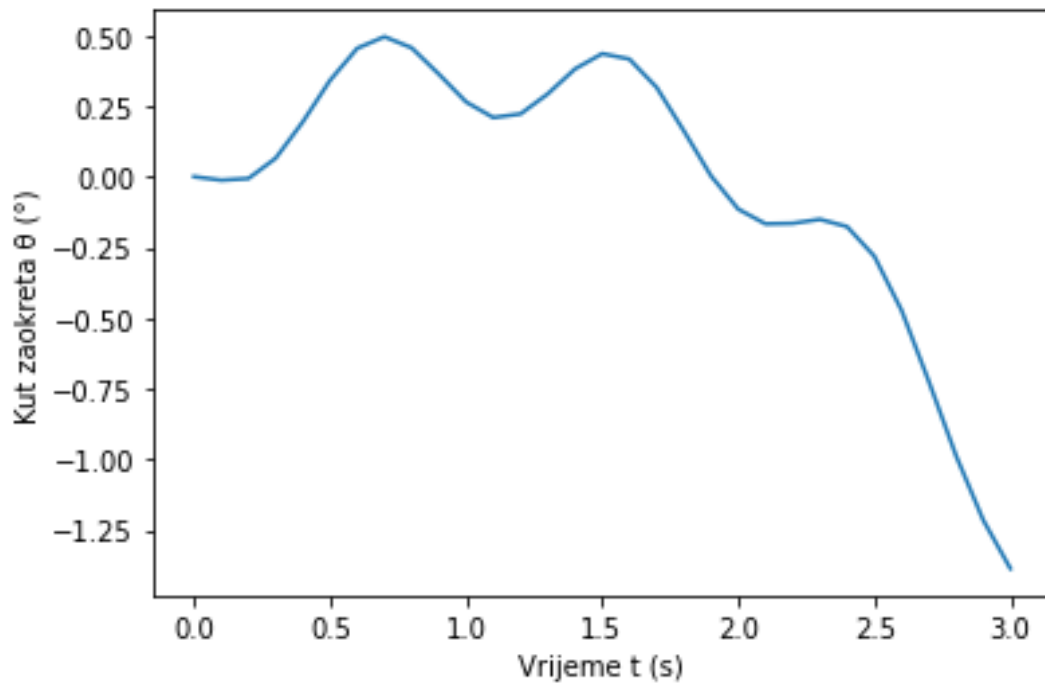
## 6.2. Ponašanje pri različitim ubrzanjima podloge

a)  $a = 10$

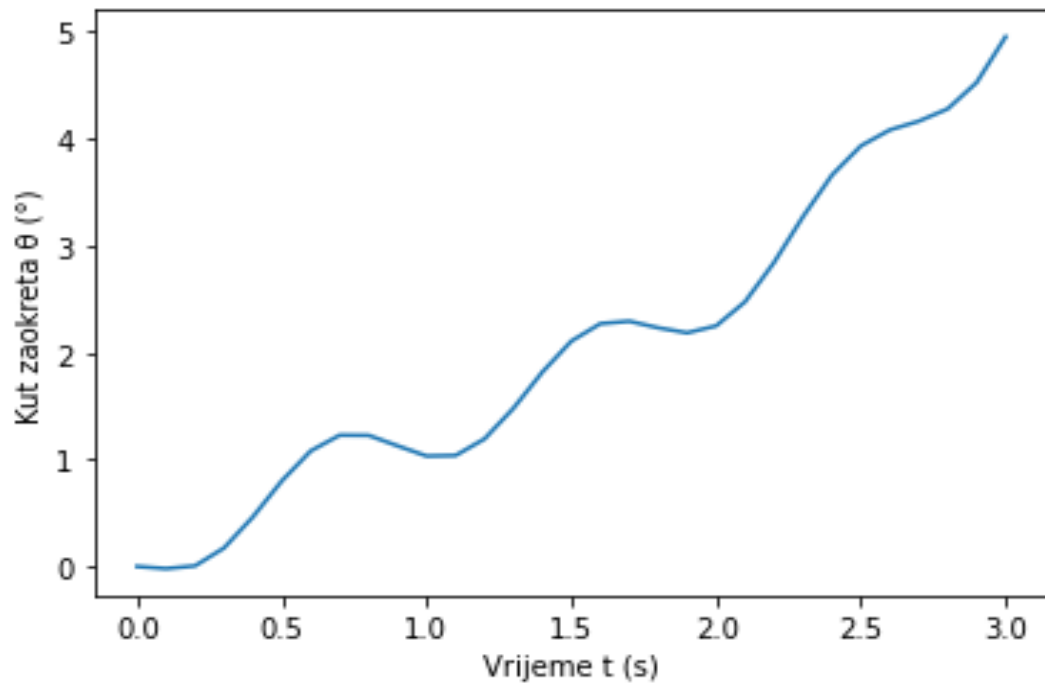




b)  $a = 100$



c)  $a = 200$

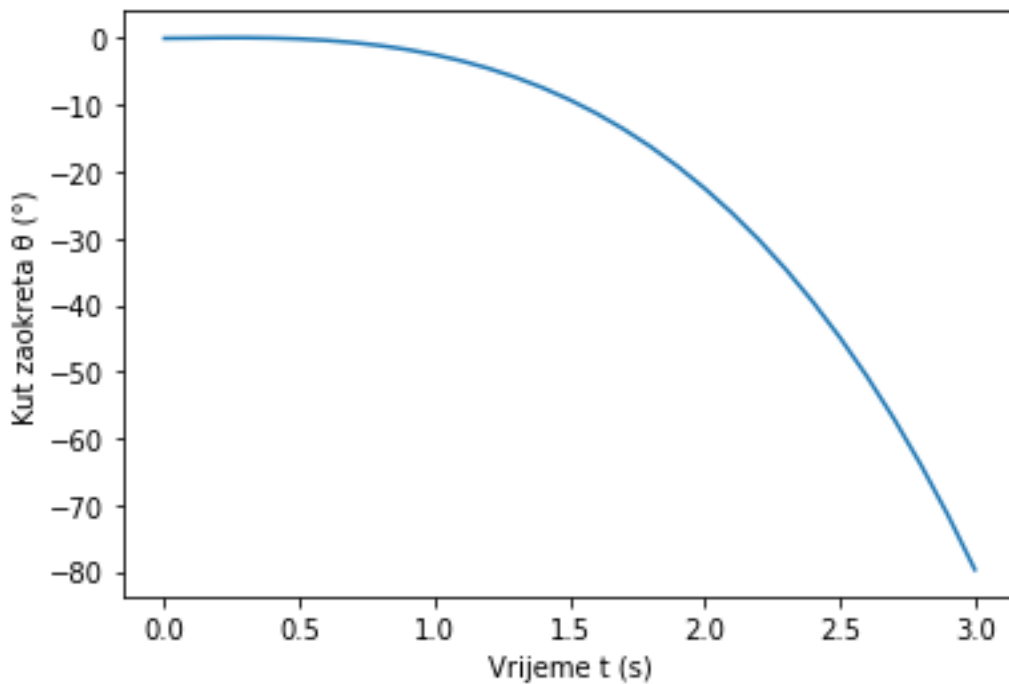




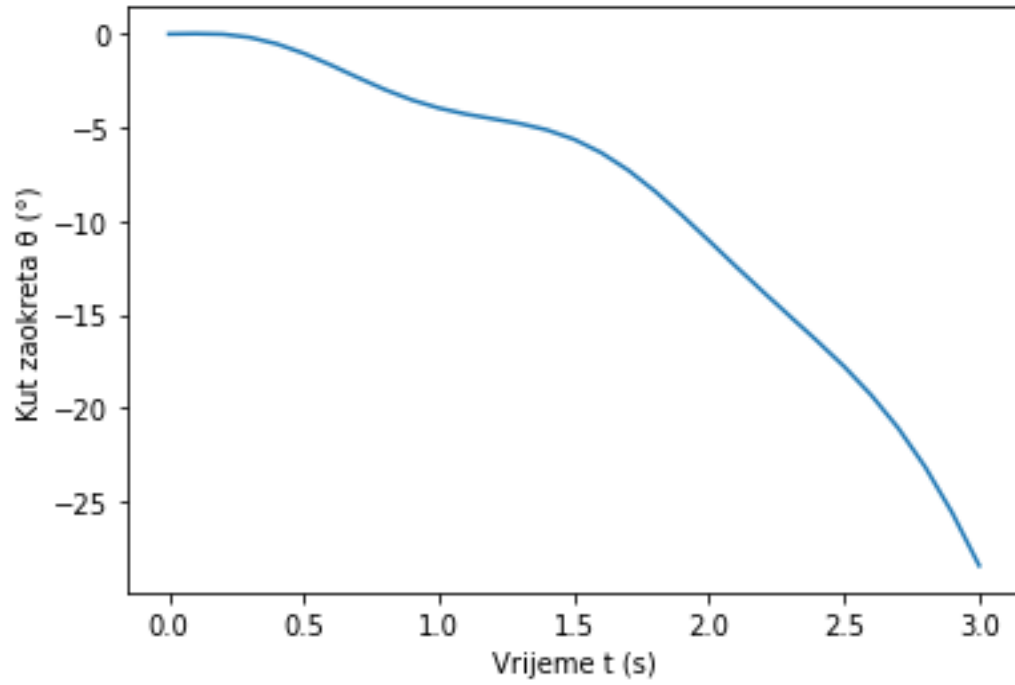
U slučaju 6.2. (promjena akceleracije podloge) dolazi samo do promjene kuta zaokreta, pa se u rezultatima prikazuju grafovi kuta zaokreta kroz vrijeme za različite akceleracije. Pri povećanju akceleracije ( $a$ ) dolazi do promjene smjera zaokreta. Kod osnovnih parametara kut zaokreta je negativan (suprotno od smjera kretanja kazaljke na satu), a prilikom povećanja ubrzanja dolazi do pozitivnog zaokreta (u smjeru kazaljke na satu).

### 6.3. Ponašanje pri različitim frekvencijama

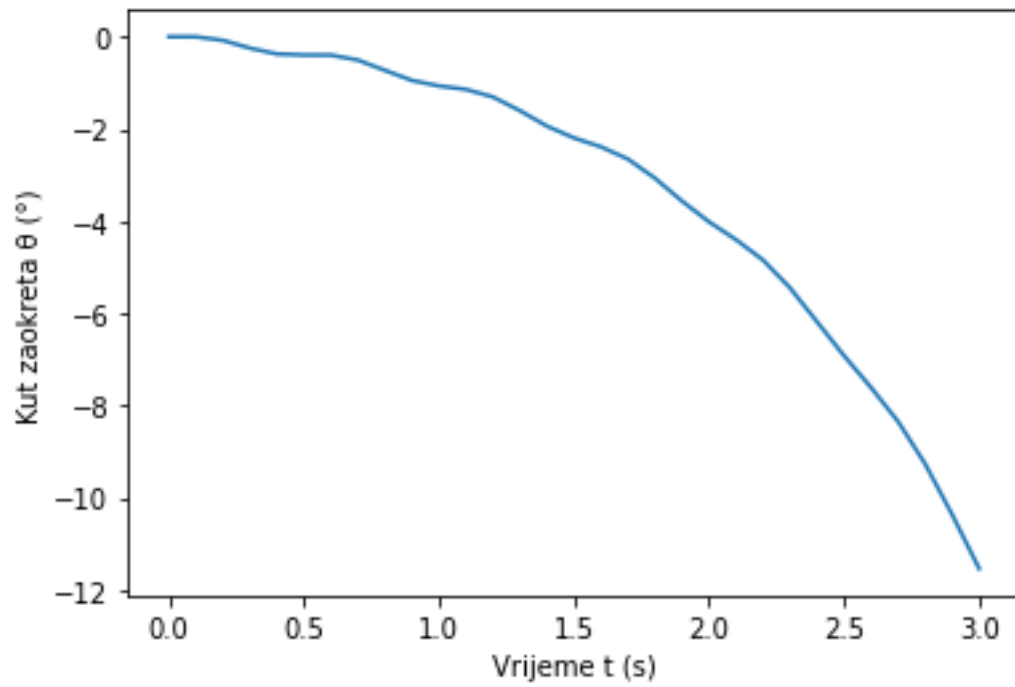
a)  $\omega = 1$



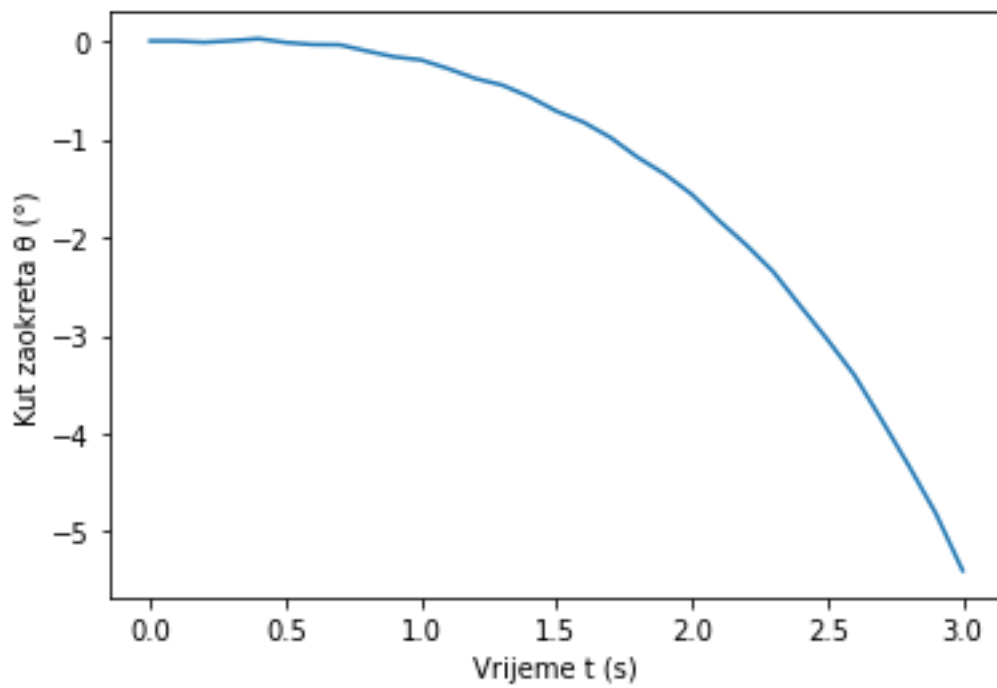
b)  $\omega = 5$



c)  $\omega = 12$



d)  $\omega = 20$

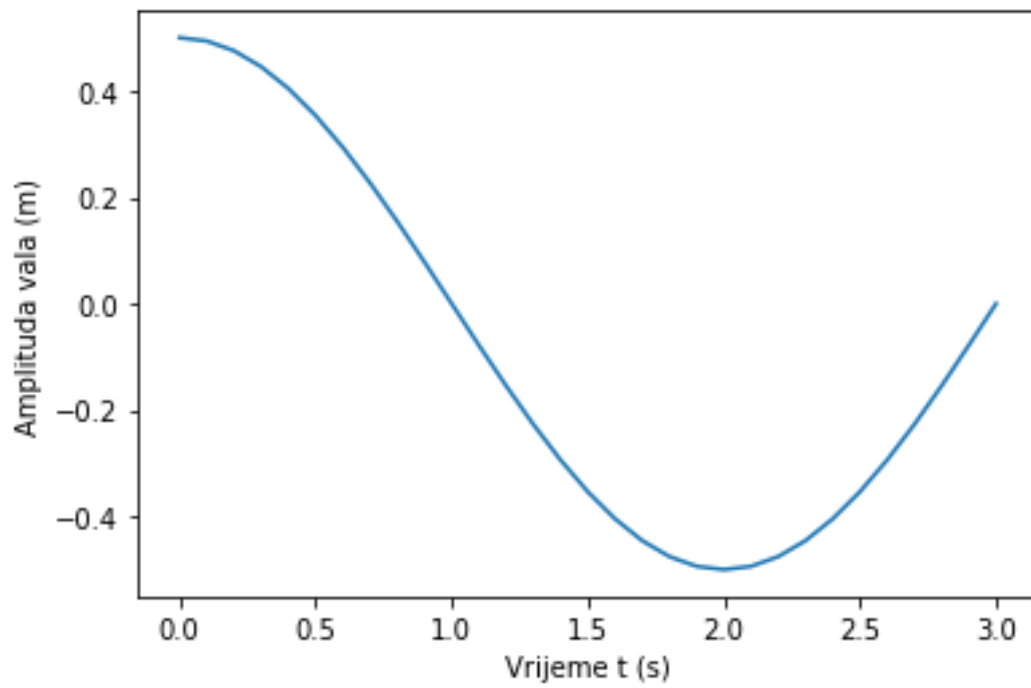


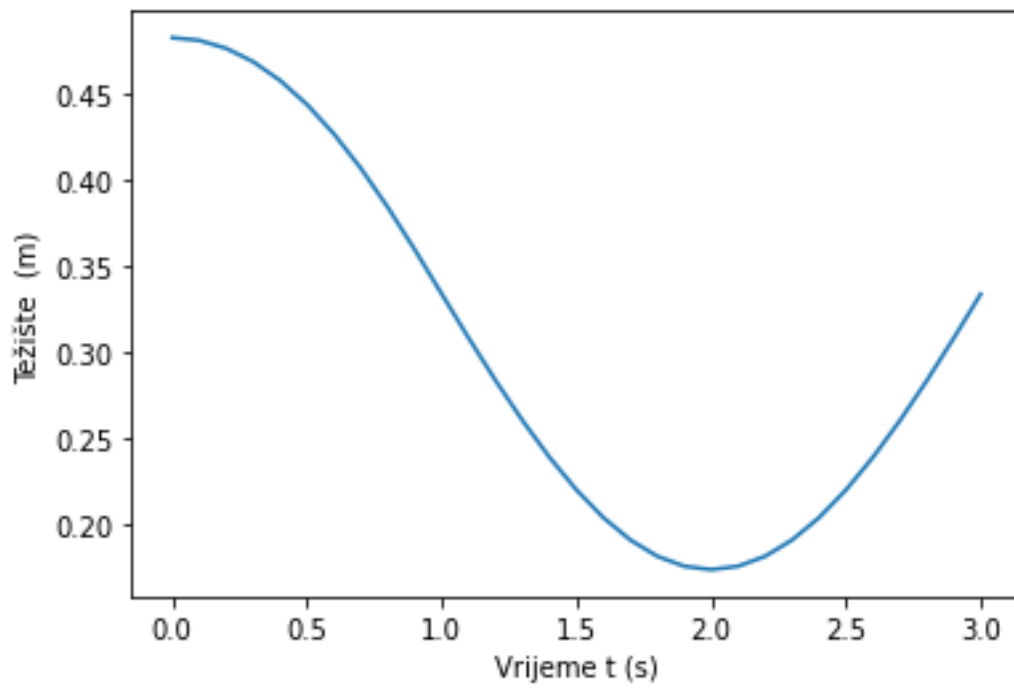
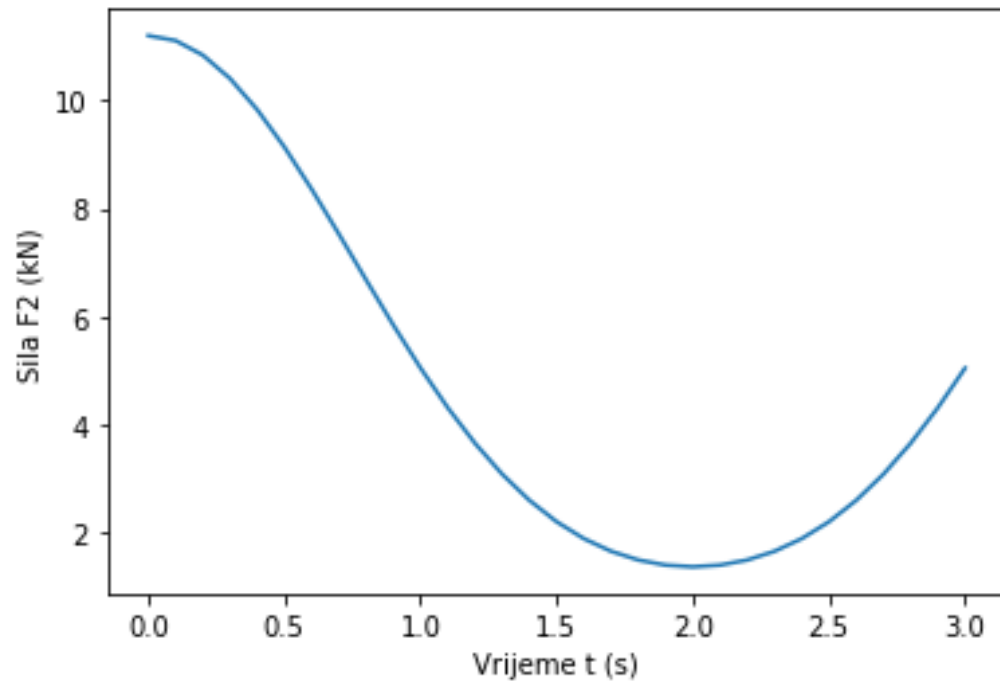
U slučaju 6.3. (promjena frekvencije ubrzanja podloge) dolazi također samo do promjene kuta zaokreta. Rezultati prikazuju promjenu kuta zaokreta te se može vidjeti smanjenje kuta zaokreta povećanjem frekvencije.

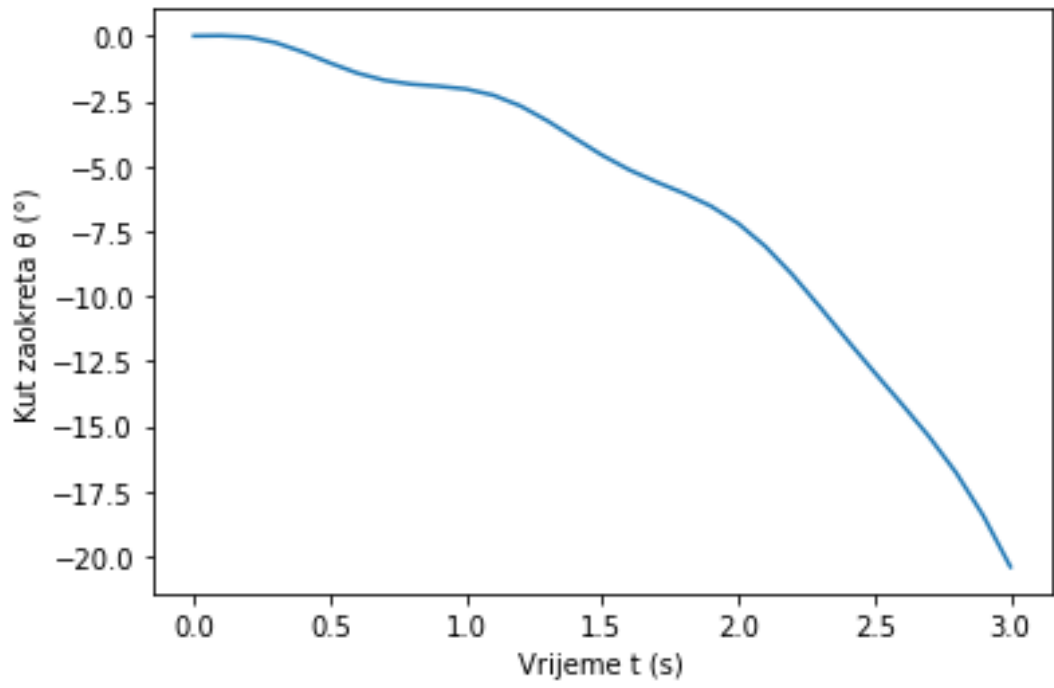
#### 6.4. Rezultati kod drukčije dubine mora

U slijedećim grafovima prikazati će se promjena amplitude vala, sile te težista sile s obzirom na dubinu mora.

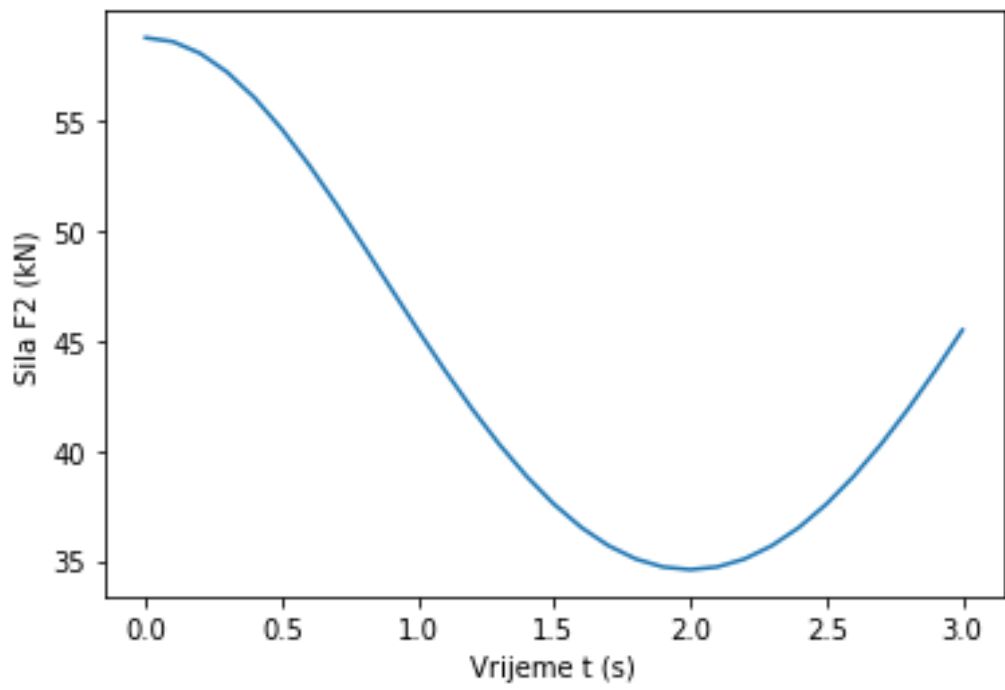
a) dubina mora = 1 m

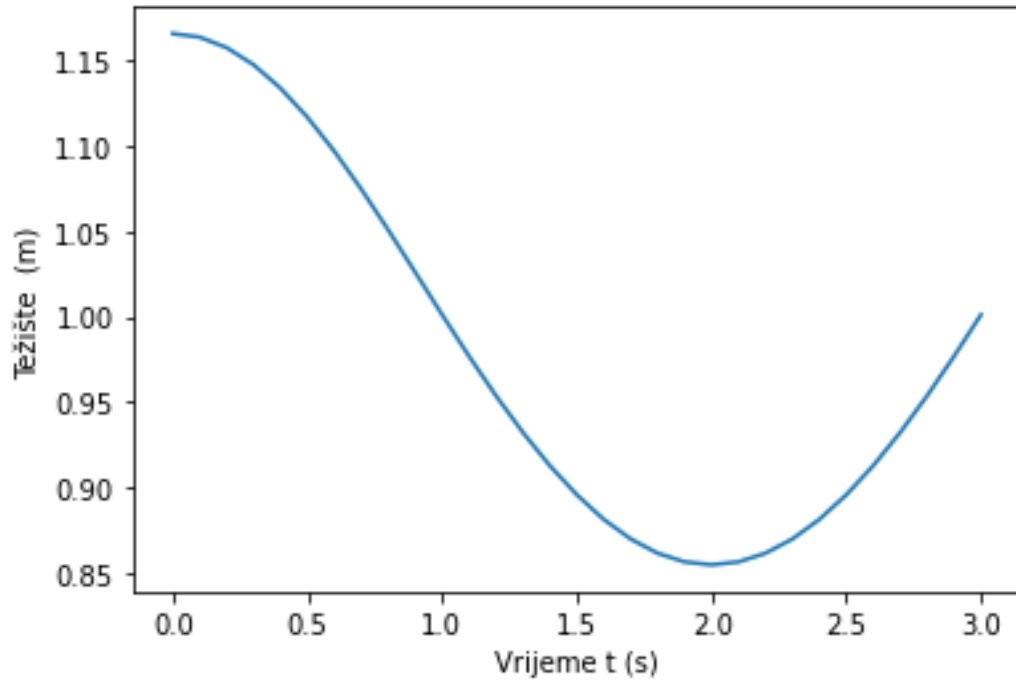




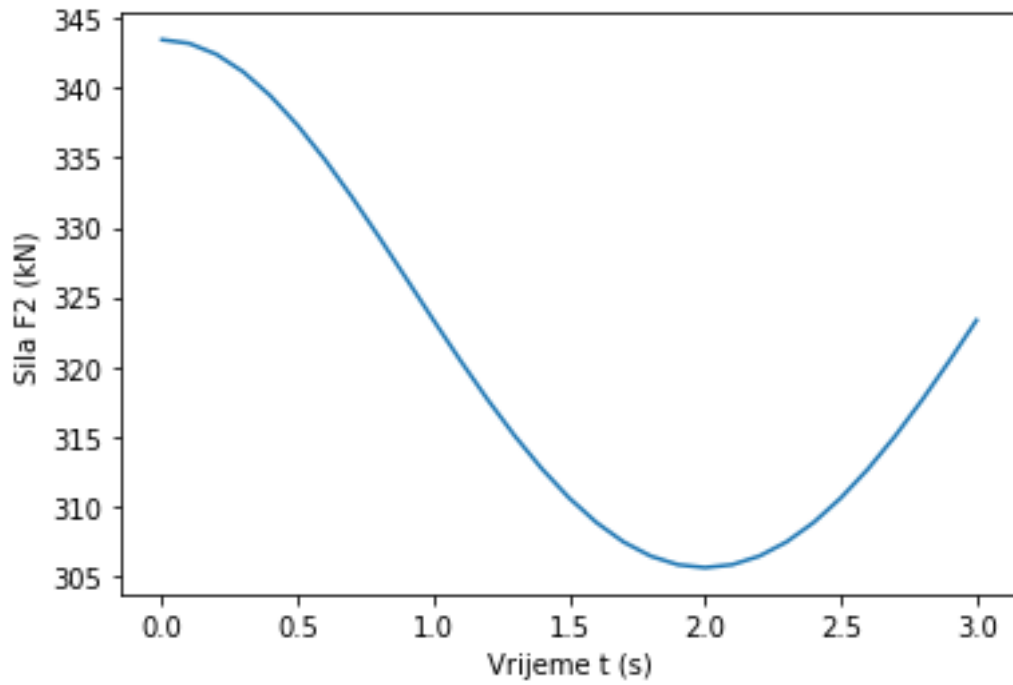


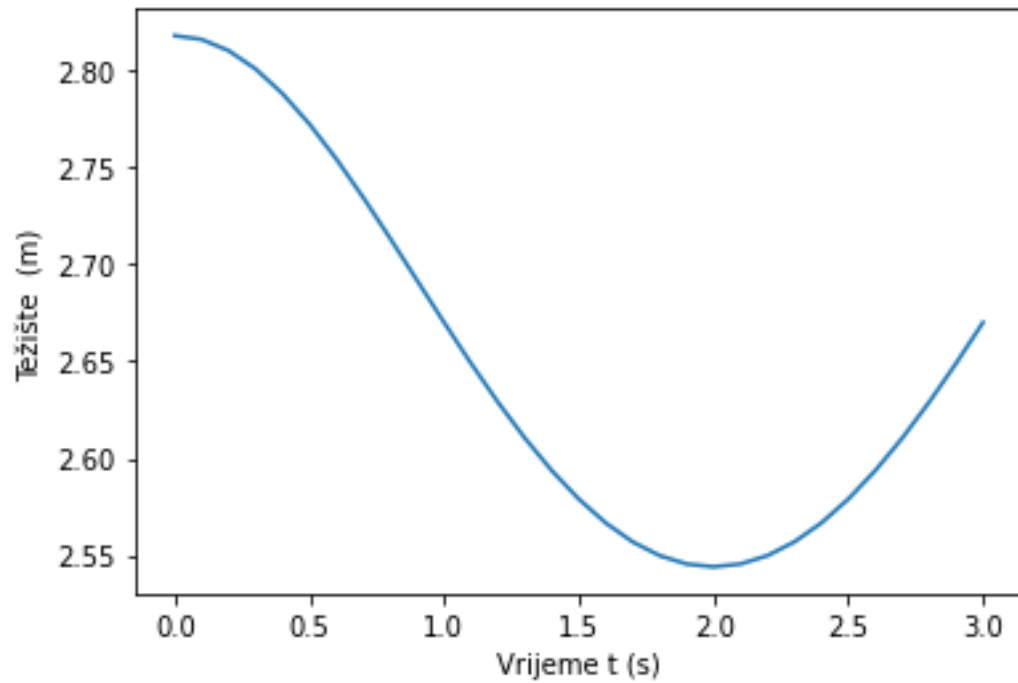
b) dubina mora = 3 m





c) dubina mora = 8 m





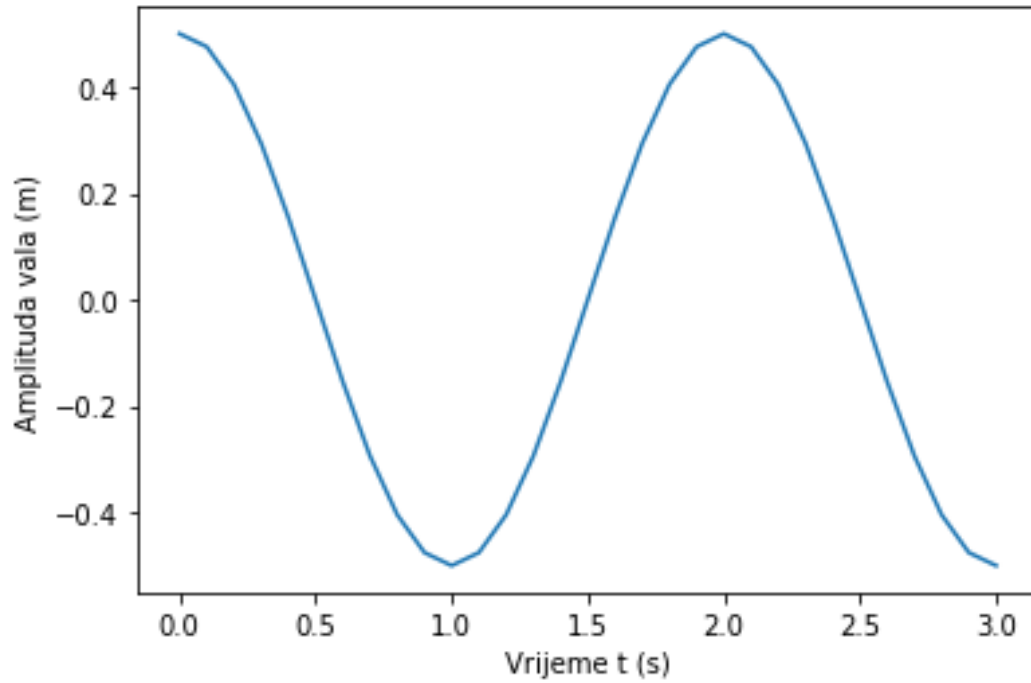
Slučaj 6.4. (promjena dubine mora) mijenja se samo sila  $F_2$  koja djeluje na model te težište sile. Dubina mora ne utječe na kut zaokreta. Povećanjem dubine mora dolazi do povećanja sile  $F_2$ .

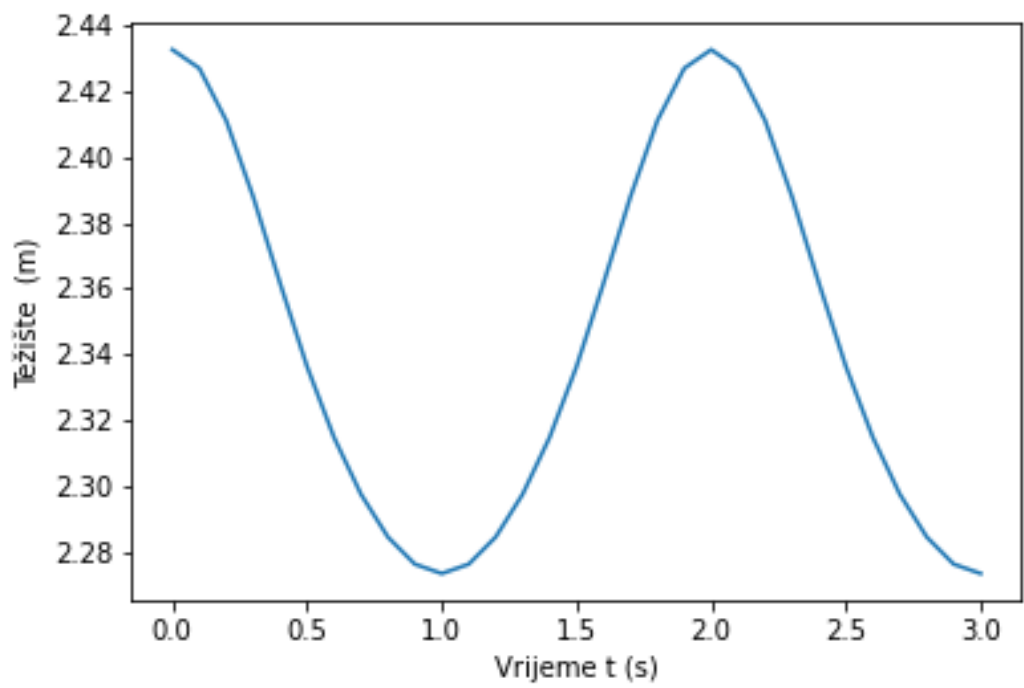
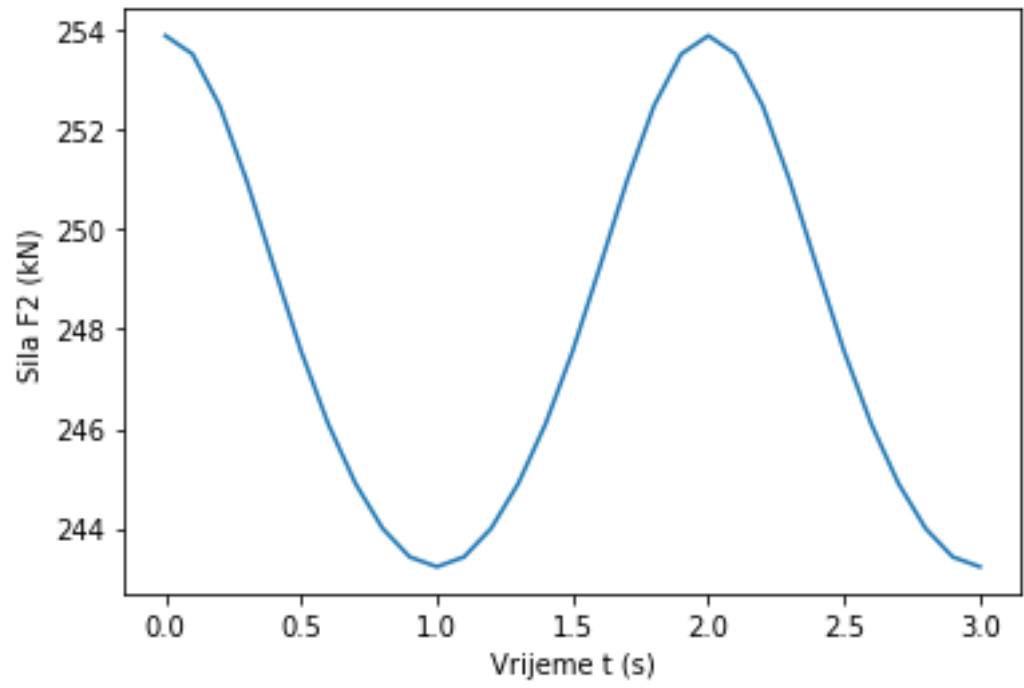


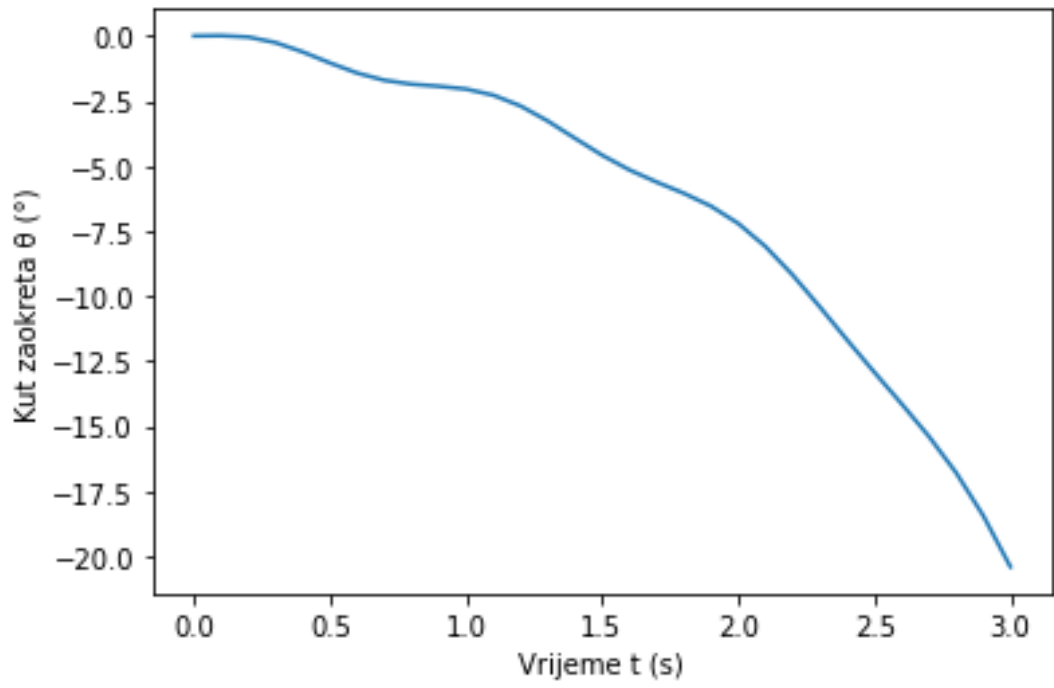
## 6.5. Rezultati pri promjeni periode vala

U slijedećim grafovima prikazati će se promjena amplitude vala, sile te težista sile s obzirom na periodu vala.

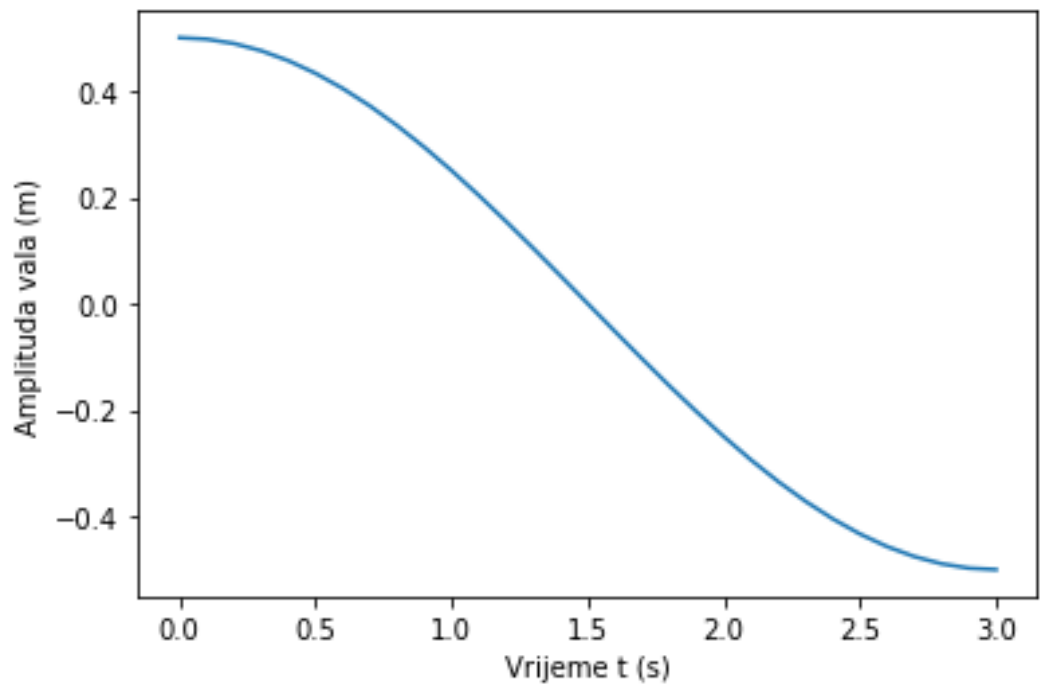
a) period vala = 2 s

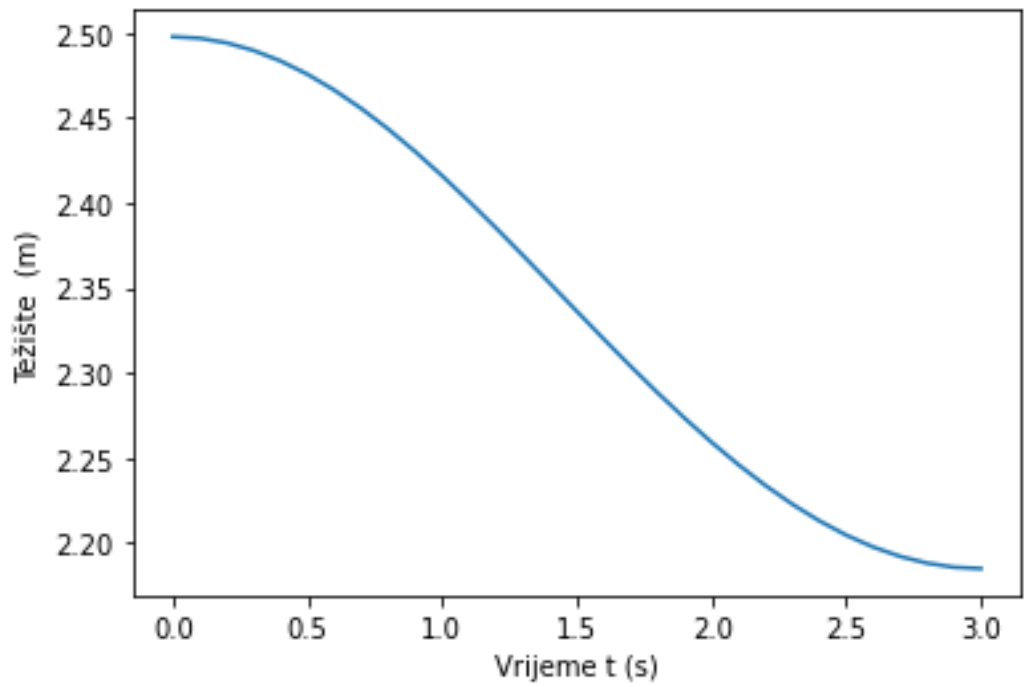
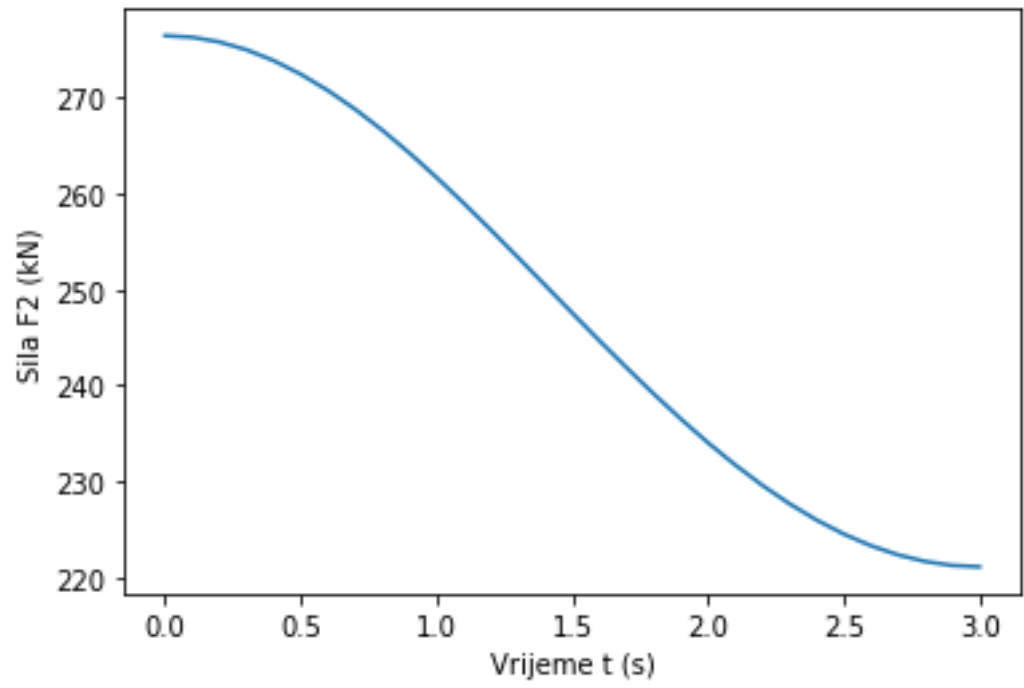


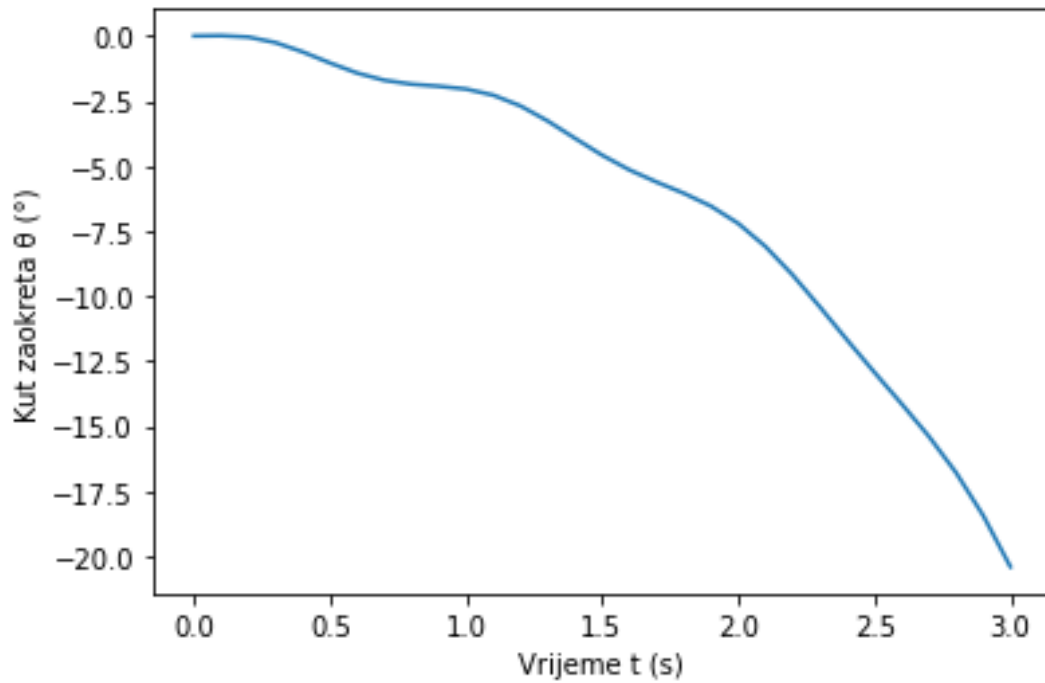




b) period vala = 6 s





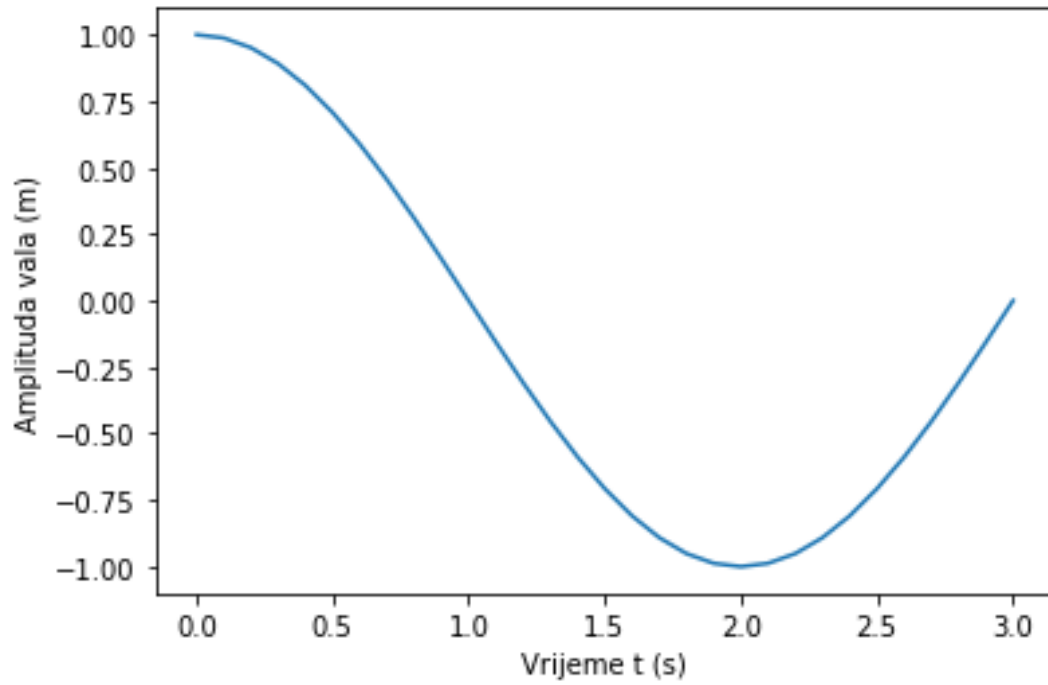


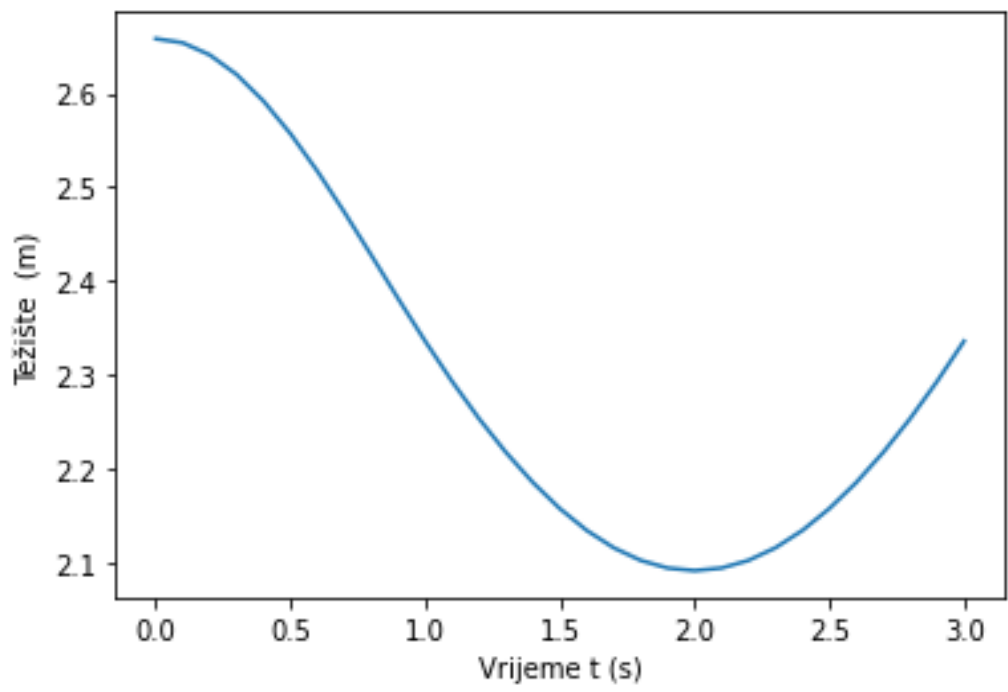
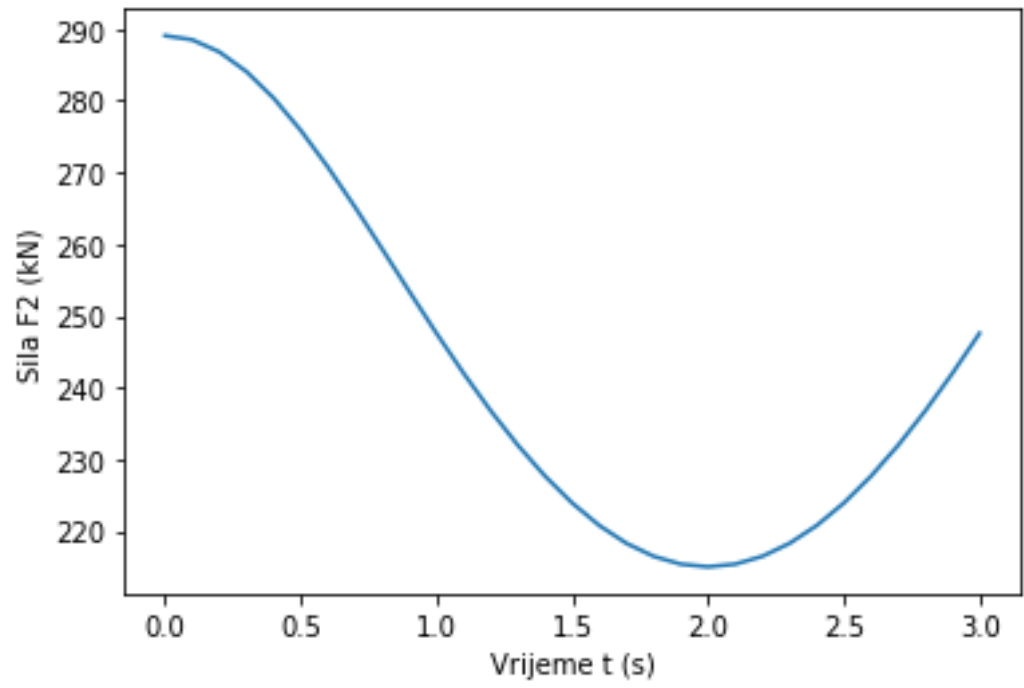
Slučaj 6.5. (promjena periode vala) mijenja se sila  $F_2$ , težiste sile te amplituda vala. Ne dolazi do promjene kuta zaokreta, već ostaje isti kao i kod osnovnih parametara.

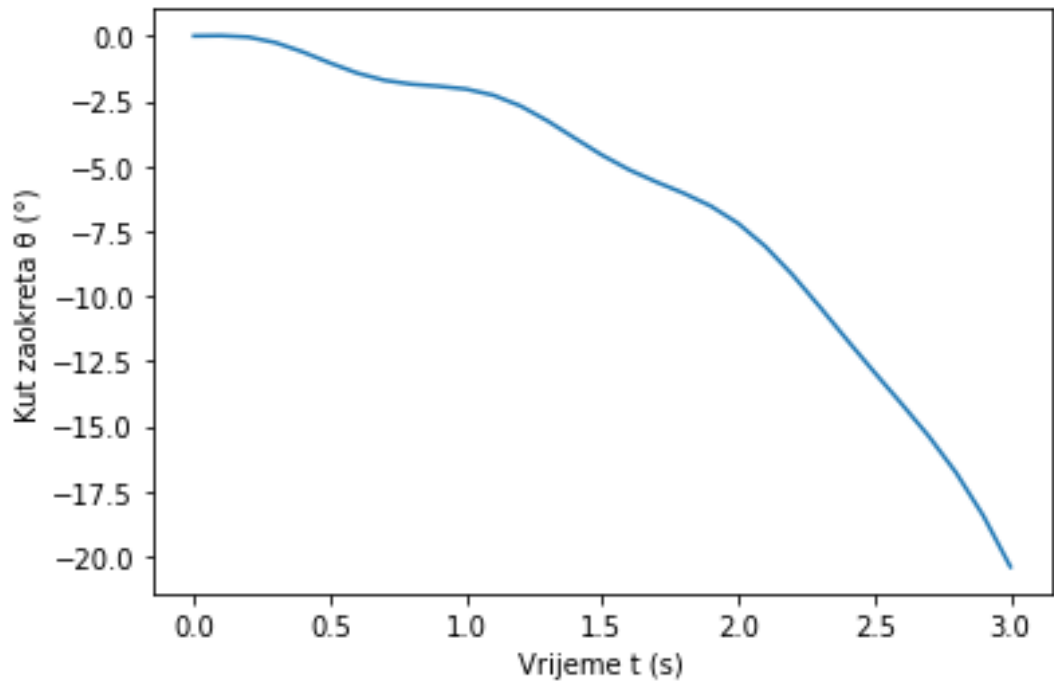
## 6.6. Rezultati pri promjeni visine vala

U slijedećim grafovima prikazati će se promjena amplitude vala, sile, težista sile te kut zaokreta s obzirom na visinu vala.

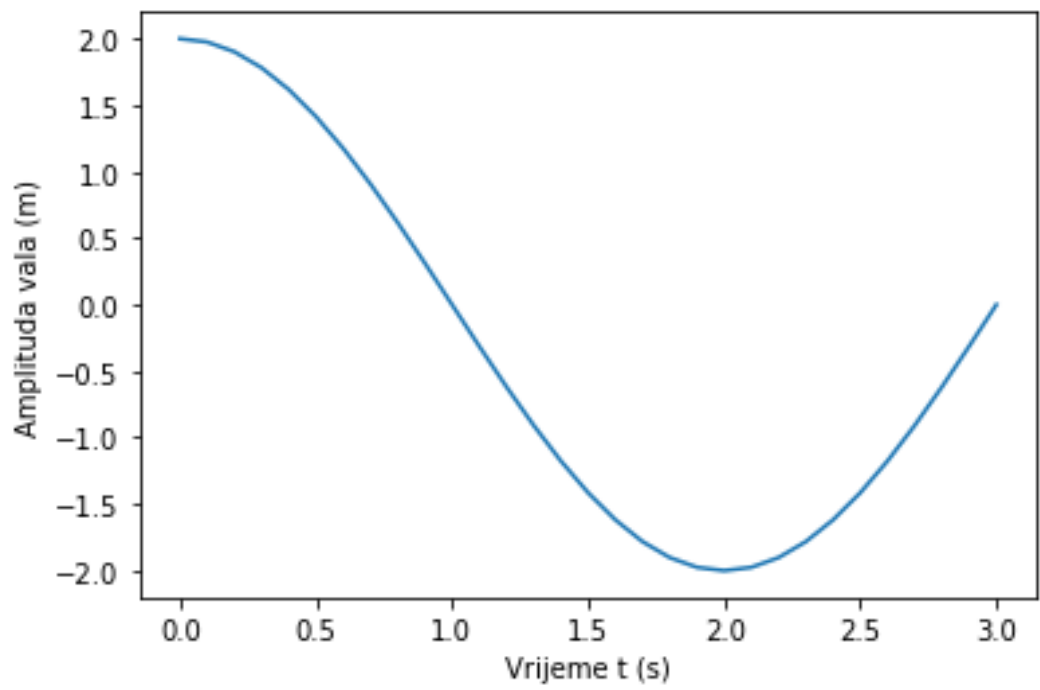
a) visina vala = 2 m



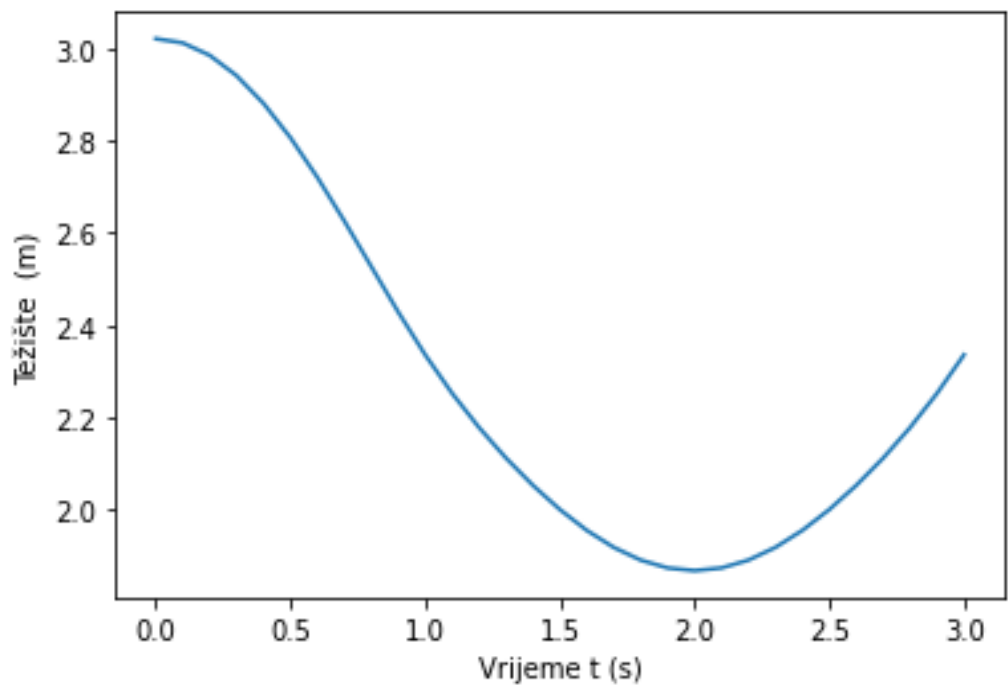
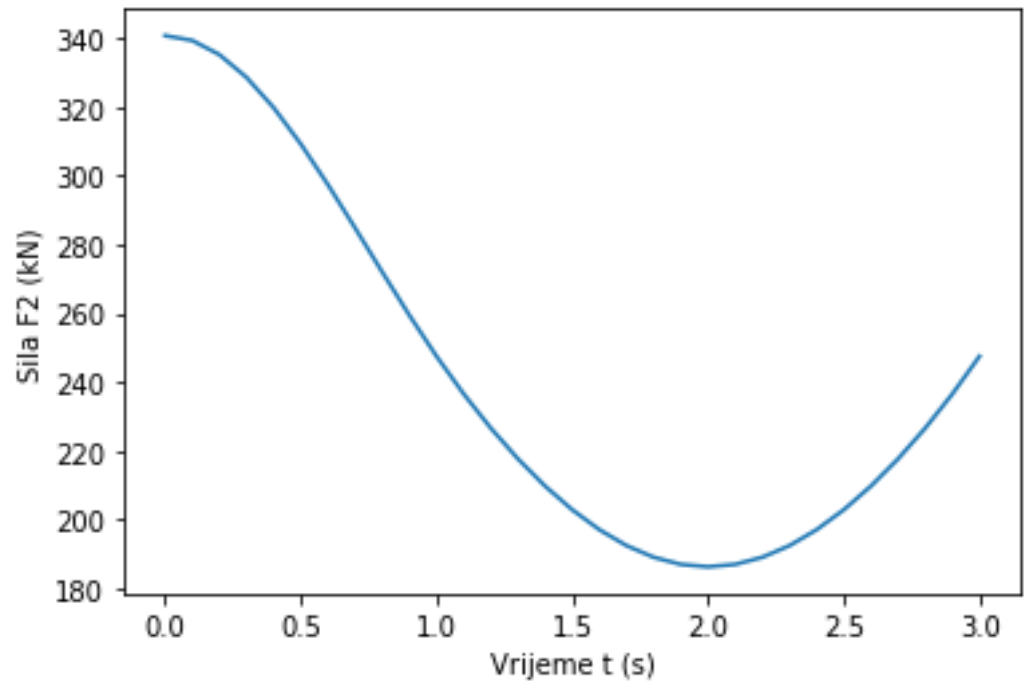


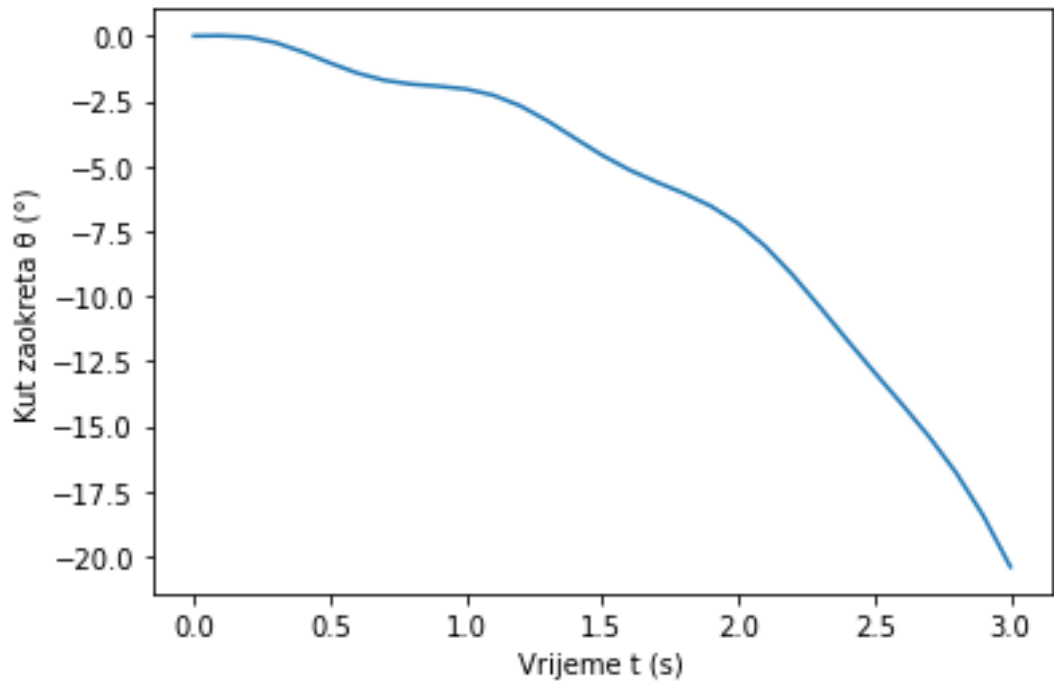


b) visina vala = 4 m

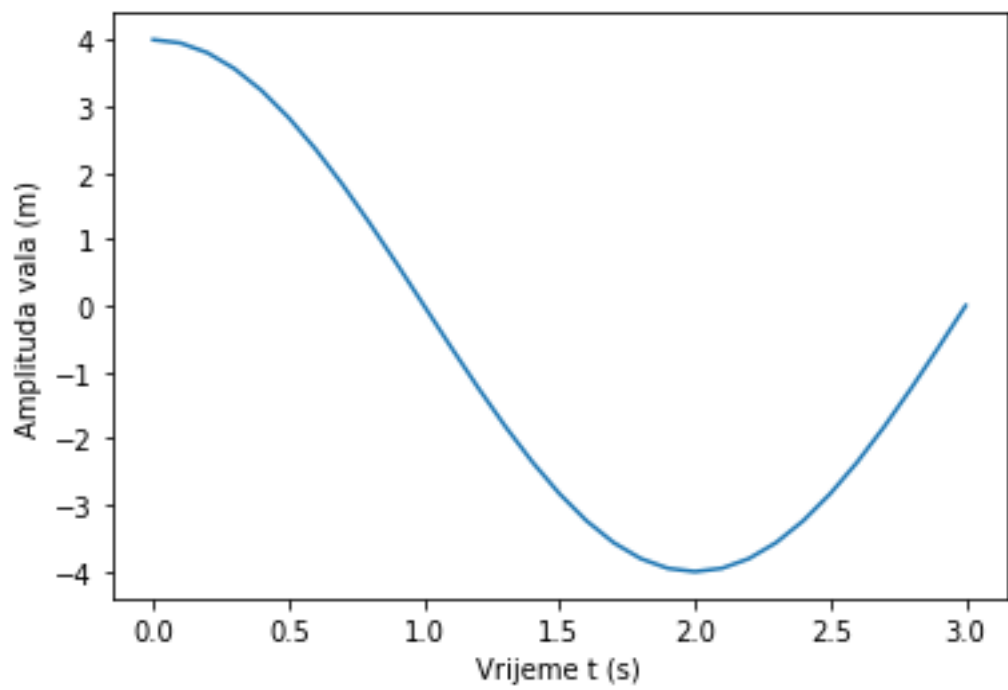


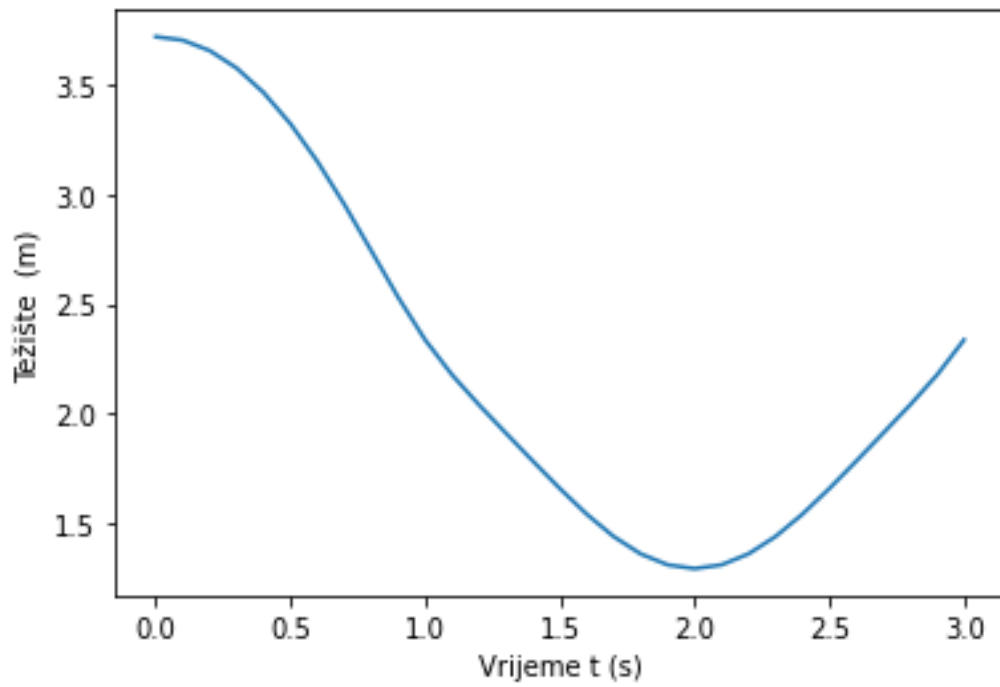
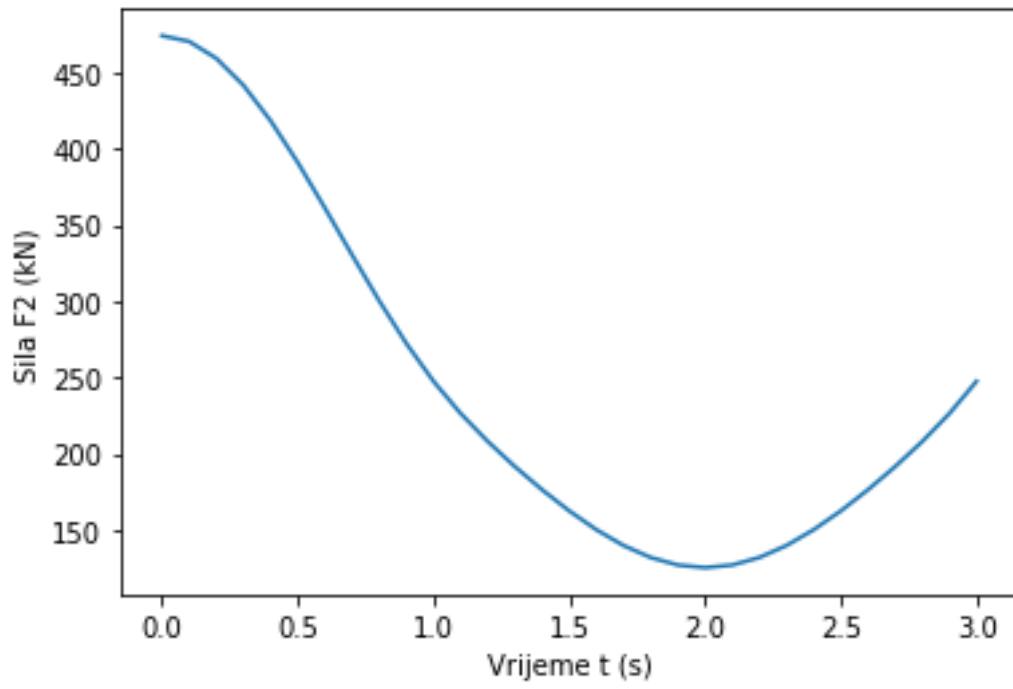


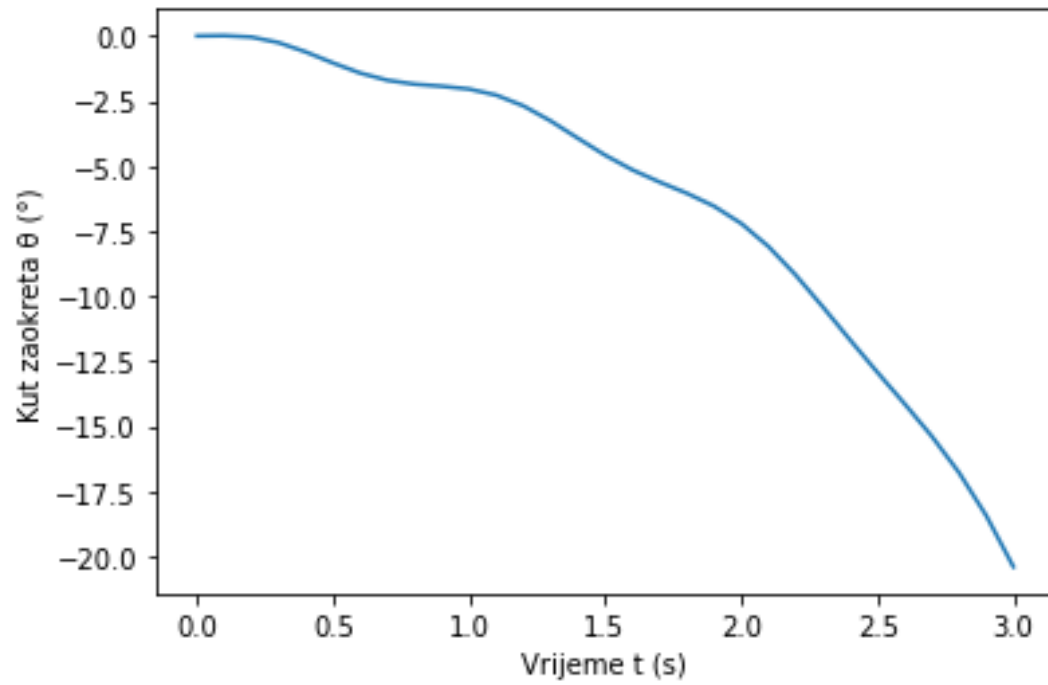




c) visina vala = 8 m







Slučaj 6.6. (promjena visine vala) također dolazi do promjene amplitude vala, vrijednosti sile  $F_2$ , kao i težista sile.

## 7. ZAKLJUČAK

Predmet ovog rada je provjeravanje stabilnosti vertikalnog lukobrana uz djelovanje mora te gibanja podloge. U pythonu kodu zapisano je gibanje mora kao djelovanje valova kroz vrijeme te promjena kuta zaokreta. Promatrano vrijeme ponašanje modela je 3 sekunde. Rezultati su prvo prikazani za osnovne parametre. Python kod potom je korišten za različite vrijednosti nekih parametara. Promatran je kut zaokreta, amplituda vala, horizontalna sila ( $F_2$ ) koja djeluje na model nastala djelovanjem mora te težiste te sile.

Vrijednosti koje su promijenjene su ubrzanje podloge, frekvencija ubrzanja podloge, dubina mora, perioda te visina vala.

Nakon prikazanih grafova za različite varijable parametara možemo zaključiti da na stabilnost obalnog zida; tj. na kut zaokreta utječe samo gibanje podloge, a ne i parametri gibanja mora.

## **8. LITERATURA**

Carević, D., Pršić, M., Pomorske građevine, web skripta, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2018.

Costal Engineering Manual, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 2003.

Čeh, Nina, A Contribution to Dynamic Characterisation of Ordered Blocky Systems, doktorska disertacija, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2018.

Wilson, E., 3D static and dynamic analysis of structures, Computers and Structures, Inc, Berkeley, California, 1998.

## 9. PRILOZI

```
1 # -*- coding: utf-8 -*-
2 """
3 Spyder Editor
4
5 This is a temporary script file.
6 """
7
8 import numpy as np
9
10 H = 1 # visina vala (m)
11 T = 4 # period vala (s)
12 d = 7 # dubina (m)
13 g = 9.81 # ubrzanje gravitacije (m/s^2)
14 rho = 1030 # gustoća vode (kg/m^3)
15 b = 5 # širina modela
16 # duljina vala
17 L = g * T ** 2 / 2 / np.pi
18 # provjera područja
19 if d / L > 0.5:
20     print("dubokovodno područje")
21 elif d / L > 0.025:
22     print("prijelazno područje")
23 else:
24     print("plitko područje")
25
26 # iterativni proračun duljine vala u prijelaznom području
27 diff = 1
28 eps = 0.01 # dozvoljena razlika
29 while diff > eps:
30     Lnew = g * T ** 2 / 2 / np.pi * np.tanh(2 * np.pi * d / L)
31     diff = L - Lnew
32     L = Lnew
33
34 #profil vala
35 trajanje = 3 #ukupno trajanje simulacije (s)
36 dt = 0.1 #vremenski korak (s) (minimalno T/10)
37 t = np.arange(0, trajanje + dt/2, dt) #vremenski niz 0,0.1,0.2
38 eta = H/2 * np.cos(2 * np.pi * t/T) #profil vala za x=0
39 N_lamela = 20 # broj lamela
40
```

```

41 import matplotlib.pyplot as plt
42 plt.figure()
43 plt.plot(t, eta)
44
45 plt.xlabel('Vrijeme t (s)')
46 plt.ylabel('Amplituda vala (m)')
47
48 sile=[]
49 tezista = []
50 for eta_i in eta:
51     print(eta_i)
52
53     #pritisak ispod vala
54
55     #za slučaj  $\eta > 0$ 
56     if eta_i > 0:
57         z = np.linspace(-d, 0, N_lamela+1)
58         p_t = (rho*g*eta_i*np.cosh(2*np.pi*(z+d)/L)/np.cosh(2*np.pi*d/L))-rho*g*z
59         z = np.append(z, eta_i)
60         p_t = np.append(p_t, 0)
61
62     #za slučaj  $\eta < 0$ 
63     elif eta_i < 0:
64         z = np.linspace(-d, eta_i, N_lamela+1)
65         p_t = (rho*g*eta_i*np.cosh(2*np.pi*(z+d)/L)/np.cosh(2*np.pi*d/L))-rho*g*z
66
67     #za slučaj  $\eta = 0$ 
68     else:
69         z = np.linspace(-d, 0, N_lamela+1)
70         p_t = -rho*g*z
71
72     #proračun sile od vala
73
74     #za slučaj  $\eta = 0$ 
75     #numpy kod
76     sirine = 0.5*(p_t[1:] + p_t[:-1])
77     debljine = np.diff(z)
78     ai = sirine * debljine
79     sila = (ai).sum()/1000 #kN
80

```



```

81     sile.append(sila)
82
83     #proračun težista sile od vala
84
85     suma_brojnik = 0
86     for i in range(N_lamela):
87         zi = z[i] + 0.5 * (z[i+1] - z[i]) # teziste lamele
88         suma_brojnik += zi * ai[i]
89
90     teziste = suma_brojnik / (sila * 1000)
91     zt = teziste - z[0]
92
93     tezista.append(zt)
94
95     plt.figure()
96     plt.plot(t, sile)
97
98     plt.xlabel('Vrijeme t (s)')
99     plt.ylabel('Sila F2 (kN)')
100
101     plt.figure()
102     plt.plot(t, tezista)
103
104     plt.xlabel('Vrijeme t (s)')
105     plt.ylabel('Težište (m)')
106
107     n = int(trajanje / dt) # broj koraka
108     m = 120000 # masa (kg)
109     g = 9.81 # ubrzanje (m/s^2)
110     B = 5 # širina bloka (m)
111     H = 10 # visina bloka (m)
112     b1 = B/2
113     h4 = H/2
114     R = np.sqrt(b1**2+h4**2)
115     alpha = np.arcsin (h4/R)
116     I = m * ( B**2 + H**2 / 12 )
117     theta = 0
118     beta = 0.25 # Newmark
119     gamma = 0.5 # Newmark
120     a = -200 # ubrzanje podloge

```

```

121 omega = 7 # frekvencija ubrzanja podloge
122 F1 = np.zeros ([int(n+1)])
123 for f1 in F1:
124     f1 = rho * g * d **2 * 1/2 * 1/1000 # sila 1 (kN)
125 F2 = np.zeros ([int(n)])
126 F2 = sile # sila 2 (kN)
127 F3 = np.zeros ([int(n+1)])
128 F3 = 1/2 * F1 + F2 # sila 3 (kN)
129 h1 = d # visina 1 (m)
130 h2 = (1/3) * d # visina 2 (m)
131 h3 = tezista # visina 3 (m)
132 h4 = H/2 # visina 4 (m)
133
134 F3h5 = 3/4 * F1 * b**2 + b**2 /2 * (F2 - F1)
135
136
137 b1 = 1/( beta * dt**2)
138 b2 = -1 / ( beta * dt)
139 b3 = 1 - (1/(2 * beta))
140 b4 = gamma / (beta * dt)
141 b5 = 1 - (gamma/beta)
142 b6 = (1 - gamma/(2 * beta)) * dt
143
144
145 theta = np.zeros ([n+1])
146 dtheta = np.zeros ([n+1])
147 ddtheta = np.zeros ([n+1])
148 ddtheta[0] = -1 * (F1[0] * h2 - F2[0] * h3[0] - F3h5[0] + m * g * R * (alpha - theta) + m * a * R) / (I + m * R **2)
149 for i in range (1,n+1):
150
151
152     A = F1[i]*h2 + F2[i]*h3[i] - F3h5[i] + m*g*R*alpha - m*R*a*np.sin(omega*(i*dt))
153     B = (-b1*theta[i-1] + b2*dtheta[i-1] + b3*ddtheta[i-1])*(I + m*R**2)
154     C = m*g*R - (I + m*R**2)*b1
155
156     theta[i] = (A + B) / C
157
158     dtheta[i] = b4*(theta[i] - theta[i-1]) + b5*dtheta[i-1] + b6*ddtheta[i-1]
159     ddtheta[i] = b1*(theta[i] - theta[i-1]) + b2*dtheta[i-1] + b3*ddtheta[i-1]
160
161
162 plt.figure()
163 plt.plot(t,theta)
164 plt.xlabel('Vrijeme t (s)')
165 plt.ylabel('Kut zaokreta theta (degrees)')

```