

SIDRNA VERIGA

VLADO MALAČIČ

Nacionalni inštitut za biologijo, Morska biološka postaja Piran

Ključne besede: sidrna veriga, verižnica

Obravnavana je oblika sidrne verige s pomočjo verižnice. Izveden je iterativni izračun parametra verižnice, ki temelji na dolžini sidrne verige ter na legi točke sidrne verige na gladini glede na sidro na morskem dnu. Določena je točka na sidrni verigi, v kateri se veriga na dnu prične vzpenjati proti plavajočemu objektu. Prikazanih je nekaj porazdelitev verižnic, ko je plavajoče telo sidrano s tremi verigami.

ANCHOR CHAIN

The anchor chain is described with the catenary curve. The parameter of the catenary is iteratively calculated from the length of the anchor chain and the point of the chain at the sea-surface with respect to the anchor at the sea floor. The point on anchor chain is determined, at which the chain starts to rise from the sea floor toward a floating body. Situations with the »three-point« anchoring are presented with a model on a table.

Uvod

Vnaprej pričakujemo, da je krivulja, ki jo opiše viseča veriga, vpeta med sidrom in plavajočim telesom nad njim, podobna verižnici. Kljub množici virov [7, str. 324] o izredno znani in razširjeni verižnici pa je še vedno potreben določen trud, da bi se dokopali do podrobnejše oblike viseče verige, če npr. poznamo osnovne podatke o verigi, kot je npr. njena dolžina, višina točke vpetja verige na plavajočem objektu nad sidrom na morskem dnu ter horizontalno oddaljenostjo (točke vpetja) plavajočega objekta od sidra, ki objekt (npr. bojo, plovilo, splav) povezuje s sidrom. Ko nas zanimajo sile, je seveda treba poznati tudi dolžinsko gostoto verige. Običajno čoln v marini privežemo tako, da ta lebdi nekje med sidrom, ki se nahaja za krmo, ter privezom na obrežju. Vmes med privezno točko na plovilu ter privezom na obrežju oz. krmo in sidrom se nahaja gibka vrv ali veriga, obe bolj ali manj sledita krivulji verižnice. Upoštevali bomo njeno težo in silo vzgona nanjo.

Nekako se morda spodobi, da med vire o verižnici navedemo tiste, objavljene v Preseku in Obzorniku. Zgodovina verižnice je zgoščeno opisana v [4], tukaj zapišimo le, da je krivulja verižnice znana okoli tri stoletja in pol, po razvoju diferencialnega računa. Zaradi pomanjkanja slednjega je verjetno antični modreci niso mogli dognati. Tako je že A. Likar [2] navedel uporabo

verižnice v obokih in kupolah. Avtorja v [5] pa sta pokazala, da se stranice kvadrata, pri katerem se središče kvadrata zgolj horizontalno pomika, kotajo po zlepljenih odsekih verižnice. Obstajajo tudi zahtevnejši prispevki [4], ki se ukvarjajo s »pravo« in simetrično verižnico v radialnem gravitacijskem polju, v katerem gravitacijska sila upada s kvadratom oddaljenosti od težišča mase, ki ustvarja tako polje. To polje pa bi prišlo do izraza le , če je verižnica pač ogromna. V njenem temenu, ki je bližje težišču mase, ki ustvarja gravitacijsko polje, je privlačna sila večja, verižnica v takem polju je zato videti bolj koničasta glede na običajno verižnico. Obravnavan je bil tudi poseben primer prave verižnice [3] (v centralnem gravitacijskem polju), za katero velja, da je njena (ločna) dolžina s produkt polarnega kota φ in polarne (radialne) oddaljenosti točke na verižnici: $s = \varphi r(\varphi)$. V prispevku [6] pa je opisana verižnica kot rezultat iskanja minimuma funkcionala potencialne energije krivulje, ki je vpeta v dveh točkah, oz. njen desni rob lahko drsi vzdolž premice. Iz minimuma funkcionala je avtor [6] pridobil diferencialni enačbi (tam enačbi (13)) drugega reda z robnimi pogoji za koordinate točk verižnice kot funkciji ločne dolžine s vzdolž verižnice, ki ju je rešil.

V [5] je tudi zapisana lastnost verižnice, za katero velja, da je naklon tangente v katerikoli njeni točki sorazmeren z dolžino krivulje od točke na njej, v kateri je tangenta na krivuljo vodoravna. Podobno je zapisal avtor v [2], ki pa je to povezal z ravnovesjem sil: teža visečega dela verižnice od opazovane točke na njej do najnižje točke, kjer je tangenta vodoravna, je namreč sorazmerna z dolžino verižnice, saj je masa $m = \mu s$, kjer je s dolžina visečega dela verige in μ dolžinska gostota, pri čemer predpostavimo homogeno verigo (μ ni funkcija prostora) in dovolj kratke člene verige, da zadoščajo za zvezen opis z diferencialnim računom. Vertikalna komponenta vlečne sile zato v ravnovesju uravnoveša težo in raste z dolžino visečega dela verige od dna do točke na verigi:

$$F \sin \alpha = g\mu s(x), \quad (1)$$

kjer je α naklonski kot (tangente) verige v opazovani točki do horizontalne osi, vzdolž katere raste koordinata x , z njo pa tudi dolžina visečega dela verige. Horizontalna komponenta vlečne sile pa je enaka vzdolž celotne verige, tako visečega dela kot tistega na vodoravnem morskem dnu

$$F \cos \alpha = F_0, \quad (2)$$

kjer je F_0 horizontalna natezna sila na verigo v »temenu« verižnice, na njenem najnižjem delu, kjer naj bo koordinata $x = x_0$. Predpostavimo še, da sta dno in veriga na njem vodoravna, da nas ne bi motilo diferencialno

pogrezanje verige v muljevito dno. Vertikalna koordinata $z = 0$ za vsak $x \in [0, x_0]$, kjer je izhodišče postavljeno v točkasto in negibno sidro. Horizontalna natezna sila F_0 verige na dnu je vzdolž verige enaka vse do sidra, seveda je tudi enaka natezni sili na verigo v vodnem stolpcu. Iz (1) in (2) pridobimo, kar je bilo navedeno že v [2], to je:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{s}{a}; \quad a = \frac{F_0}{\mu g}. \quad (3)$$

Vpeljali smo parameter a , običajen za verižnico, ki je sorazmeren horizontalni natezni sili in obratno sorazmeren dolžinski gostoti. Kako pridemo do take situacije, ko del verige raztegnjen leži na dnu? Predstavljajmo si, da smo s čolna spustili sidro na dno in se potem od sidra oddaljujemo proti obrežju, na katerega želimo čoln pritrčiti z vrvjo na kljunu. S približevanjem obrežju in z oddaljevanjem od sidra za seboj vlečemo verigo in nanjo že izvajamo silo. Če smo se odmaknili za razdaljo D , katere vsota z globino sidra (višino čolna nad sidrom) je večja od dolžine verige, $H + D > L$, je del verige na dnu raztegnjen, drugi del pa gotovo viseč in ukrivljen, saj »ni dovolj verige«, da bi se ta lahko horizontalno raztezala do oddaljenosti D , pa še v višino $z = H$. Kje pa je točka $x_0 < D$, pri kateri se veriga začne vzpenjati do »čolna«? Predpostavimo še, da je viseči del verige nad gladino na čolnu zanemarljiv. Lahko si predstavljamo na podoben način vpeto plavajočo bojo, iz katere se že pod gladino spusti sidrna veriga do dna. Masa verige (teža) prepreči, da bi v skrajno napetem stanju imeli verigo premočrtno diagonalno napeto od sidra do plavajočega telesa, torej tudi velja $L > (H^2 + D^2)^{1/2}$.

Vhodni podatki in robni pogoji

Podane imamo naslednje podatke, ki si jih izposodimo od sidranja oceanografske boje Vide: boja je horizontalno oddaljena od sidra za $D = 33$ m, višina gladine, kjer je veriga vpeta nad dnom, naj bo $H = 22$ m, dolžina verige $L = 50$ m, dolžinska gostota $\mu = 25,4$ kg/m. Meri H in D sta nezanesljivi na nekaj m , L verjetno nedoločena na manj kot 0,5 m. To so mere sidranja oceanografske boje Vide [8], ki je sicer tri-točkovno sidrana s tremi verigami dolžine L , pri čemer so v grobem (zelo v grobem) tri sidra porazdeljena okoli Vide pod kotom 120° v horizontalni oddaljenosti 33 m. Predpostavimo zgolj eno sidro. Nekaj več o treh sidrih opišemo pri koncu prispevka. Zaenkrat zadostuje, da pri opazovanju ene verige horizontalno natezno vlečno silo izvajata drugi dve verigi in njuna sidrna bloka.

Še misel o robnem pogoju naklonskega kota v točki $(x_0, 0)$, v kateri se veriga začne vzpenjati. Ker je po (3) naklon tangente sorazmeren dolžini visečega dela pod opazovano točko, tega pa v tej točki pač ni, je naklon in s tem $\alpha(x_0) = 0$. Zato kar zapišemo:

$$z(x_0) = 0; \quad \left(\frac{dz}{dx}\right)_{x_0} = p(x_0) = (\operatorname{tg} \alpha)_{x_0} = 0. \quad (4)$$

Vpeljali smo funkcijo odvoda višine po x oz. naklona tangente $p(x)$. Naklonski kot pri boji v točki (D, H) pa bomo določili, ko bomo razrešili enačbo verižnice, kar pomeni po določitvi vrednost parametra a . V tej točki pričakujemo kar visoko strmino naklona, saj sta pod to točko največja dolžina in masa visečega dela verige.

Zapis verige

Kot že povedano, gre za izjemno razširjeno krivuljo, ki je analitično dobro razdelana. V Preseku [5] sta avtorja očitno predpostavila, da bralci revije obvladajo osnove višje matematike. Ubrala sta eleganten pristop do verižnice, ki temelji na levi strani (3) in na zapisu elementa ločne dolžine ds z naklonom $p(x)$ v točki (x, z) :

$$ds = \sqrt{1 + p^2(x)} dx; \quad \frac{d\vec{r}}{ds} = \left(\frac{dx}{ds}, \frac{dz}{ds}\right) = (\cos \alpha, \sin \alpha), \quad (5)$$

kjer smo dodali spremembo krajevnega vektorja \vec{r} z ločno dolžino, zapisano s komponentami enotskega vektorja tangente na krivuljo. Leva stran (5) ob uporabi (3) preide v

$$s' = \sqrt{1 + p^2(x)}; \quad p' = \frac{s'}{a} = \frac{1}{a} \sqrt{1 + p^2(x)}, \quad (6)$$

kjer je $(\prime) = d()/dx$. Z ločitvijo spremenljivk p in x v desnem izrazu v (6) sta avtorja [5] hitro pridobila, da je integral za x/a sorazmeren s funkcijo $\operatorname{arsh}(x/a)$, od koder sledi, da je $p(x)$ do aditivne konstante sorazmeren s $\operatorname{sh}(x/a)$, zato je tudi rešitev $z(x)$ sorazmerna s $\operatorname{ch}(x/a)$, poleg sta tudi dve konstanti. Tukaj bomo sledili morda »običajnejši« izpeljavi, podobni kot v [7], vendar s sledenjem robnim pogojem, ki ustrezajo našemu problemu. V ta namen zapišemo spremembe koordinat z naklonskim kotom:

$$\frac{dx}{d\alpha} = \frac{dx}{ds} \frac{ds}{d\alpha} = \frac{a}{\cos \alpha}; \quad \frac{dz}{d\alpha} = \frac{dz}{ds} \frac{ds}{d\alpha} = \sin \alpha \frac{a}{\cos^2 \alpha}, \quad (7)$$

pri čemer smo uporabili desni izraz v (5) ter levi v (3). Za vertikalno koordinato hitro pridobimo odvisnost od naklonskega kota z elementarnim integriranjem in upoštevanjem robnega pogoja (4)

$$z = a \left[\frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right] \quad (8)$$

Iz (7) pa $x(\alpha)$ ne sledi tako hitro, vendar je integracija možna na več načinov, izvede se npr. z uporabo »univerzalne substitucije« pod integralom $t = \operatorname{tg}(\alpha/2)$ [1, str. 324], ali pa z uporabo tabel nedoločenih integralov [1, integral 325 na str. 879]. Tukaj sledimo posnetku [9] s privlačno spremembo argumenta pod integralom po α :

$$\begin{aligned} x - x_0 &= a \int_0^\alpha \frac{d\alpha}{\cos \alpha} = a \int_0^\alpha \frac{(\operatorname{tg} \alpha + 1/\cos \alpha)d\alpha}{\cos \alpha(\operatorname{tg} \alpha + 1/\cos \alpha)} \\ &= a \int_0^\alpha \frac{[(1/\cos^2 \alpha) + (\sin \alpha/\cos^2 \alpha)]d\alpha}{(\operatorname{tg} \alpha + 1/\cos \alpha)} \\ x - x_0 &= a \int_0^\alpha \frac{d(\operatorname{tg} \alpha + 1/\cos \alpha)}{(\operatorname{tg} \alpha + 1/\cos \alpha)} = a \ln[\operatorname{tg} \alpha + 1/\cos \alpha] \end{aligned} \quad (9)$$

ali

$$e^{(x-x_0)/a} = \operatorname{tg} \alpha + 1/\cos \alpha. \quad (10)$$

Podobno sledi

$$\begin{aligned} e^{-(x-x_0)/a} &= \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha + 1/\cos \alpha} = \frac{\cos \alpha(1 - \sin \alpha)}{(1 + \sin \alpha)(1 - \sin \alpha)} = \frac{1 - \sin \alpha}{\cos \alpha} \\ e^{-(x-x_0)/a} &= -\operatorname{tg} \alpha + 1/\cos \alpha. \end{aligned} \quad (11)$$

S seštevanjem (10) in (11) se znebimo $\operatorname{tg} \alpha$, delimo z 2, upoštevamo (8) in pridobimo rešitev:

$$z = a \left[\operatorname{ch} \left(\frac{x - x_0}{a} \right) - 1 \right]. \quad (12)$$

Vloga parametra a je torej dvojna: pomeni vertikalni razteg (»amplitudo«) verižnice in hkrati tudi normalizacijo argumenta. Naklon tangente na krivuljo je

$$p = \operatorname{sh} \left[\frac{x - x_0}{a} \right]. \quad (13)$$

Z (12) in (13) tudi izpolnjujemo robna pogoja (4). Kaj pa dolžina dvignjenega dela verižnice? Lahko integriramo levi del (5) s pomočjo (13) od $x = x_0$ dalje, vendar je dolžina dvignjenega dela s že bila zapisana v (3),

saj je sorazmerna naklonu verižnice, tu jo zgolj prepíšimo s pomočjo (13) v drugo obliko

$$s = a \operatorname{sh} \left[\frac{x - x_0}{a} \right]. \quad (14)$$

Zapišimo še zvezo med celotno dolžino verige L in višino verige pri boji H , pri čemer je horizontalna oddaljenost boje od sidra D :

$$\begin{aligned} L &= a \operatorname{sh} \left(\frac{D - x_0}{a} \right) + x_0; & H &= a \left[\operatorname{ch} \left(\frac{D - x_0}{a} \right) - 1 \right]; \\ \operatorname{ch}^2 \left(\frac{D - x_0}{a} \right) - \operatorname{sh}^2 \left(\frac{D - x_0}{a} \right) &= \frac{(H + a)^2}{a^2} - \frac{(L - x_0)^2}{a^2} = 1; \\ L - x_0 &= \sqrt{H(H + 2a)}; & x_0 &= L - \sqrt{H(H + 2a)}. \end{aligned} \quad (15)$$

Tako smo lego začetka dvigovanja verižnice x_0 izrazili z dolžino verige L in višino H nad dnom.

Čaka nas še določitev parametra a . Lahko bi opisali več neposrečenih poskusov iskanja iterativne rešitve, na tem mestu raje sledimo poti [7], ki je z našo rešitvijo tako videti:

$$\begin{aligned} s^2 - z^2 &= a^2 \left[\operatorname{sh}^2 \left(\frac{x - x_0}{a} \right) - \left(\operatorname{ch} \left(\frac{x - x_0}{a} \right) - 1 \right)^2 \right] \\ s^2 - z^2 &= 2a^2 \left[-1 + \operatorname{ch} \left(\frac{x - x_0}{a} \right) \right] = 4a^2 \operatorname{sh}^2 \left(\frac{x - x_0}{2a} \right). \end{aligned} \quad (16)$$

V (16) vstavimo znane podatke pri $x = D$ (tedaj $s = L - x_0$ in $z = H$) in x_0 iz (15), uporabimo tudi izraz za sh polovičnega kota

$$H = 2a \operatorname{sh}^2 \left[\frac{(D - L + \sqrt{H(H + 2a)})}{2a} \right]. \quad (17)$$

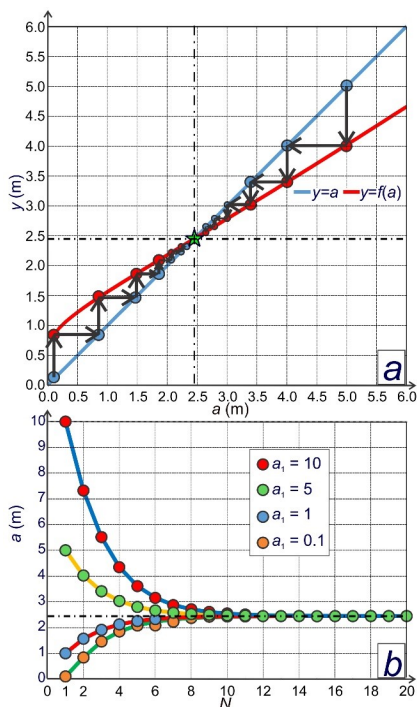
Od tod sami uberemo iterativni postopek, ki konvergira:

$$a_{N+1} = \frac{(D - L + \sqrt{H(H + 2a_N)})}{2 \operatorname{arsh} \left(\sqrt{\frac{H}{2a_N}} \right)} \quad (18)$$

in o katerem bo še tekla beseda.

Rezultati

Izraz (18) na srečo konvergira za katerokoli vrednost $a > 0$. Oglejmo si sliko iteracij za a , tako pri iskanju presečišča med premico $y = a$ in iracionalno funkcijo $f(a)$ (slika 1a), ki je izraz na desni strani v (18), kot pri različnih začetnih vrednostih (slika 1b).

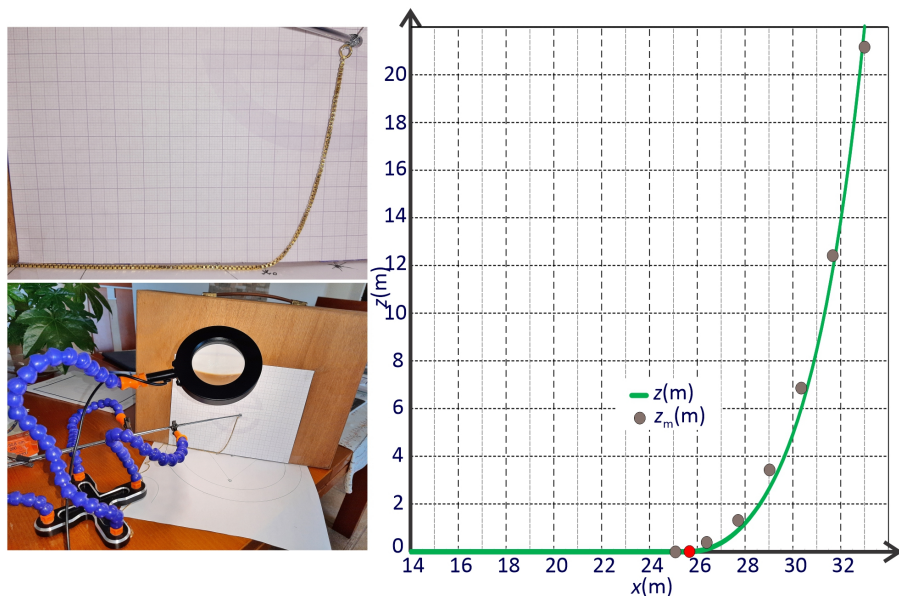


Slika 1. a) Iteracijski postopek za $a_1 = 0,1$ m in za $a_1 = 5$ m. b) Konvergenca iteracij za različne začetne vrednosti.

Izberemo kar $a_1 = 1$ m. Iteracijo lahko izvedemo v katerem koli znanem orodju, tudi v Excelu. Z njo pridobimo $a_{20} = 2,44869$ m, $a_{21} = 2,44873$ m, kar zaokrožimo na $a = 2,4487$ m, torej na zadostno natančnost pod mm. Po (15) in vhodnih podatkih je $x_0 = 25,674$ m, po (12) in (14) za $x = D$ s takim a pa postane $z = 22,002$ m in $s(D) + x_0 = 50,002$ m, kar je zadostno ujemanje s H in L . Naklon tangente pri $x = x_0$ je 0, pri $x = D$ pa je po (13) $p(D) = 9,93$ in s tem $\alpha = 84,25^\circ$.

Končno si oglejmo znano krivuljo. V ta namen smo si omislili ponazoritev razmer z okrasno verižico, ki smo jo raztegnili po podlagi in na enem koncu privzdignili. Mere verižice in »drugih danosti« so narekemale, da smo

izbrali malo čudno merilo za ponazoritev stanja na morju z eno verigo. Dimenziji D in H smo zmanjšali za faktor 264. Modelska ponazoritev je na fotografijah na sliki 2, na diagramu smo prenesli odčitke sedmih točk oblike verižice iz milimetrskega papirja.



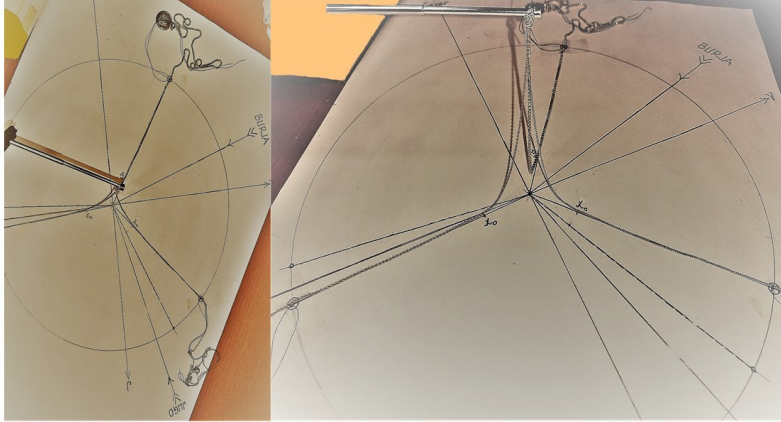
Slika 2. Fotografiji prikazujeta modelsko predstavitev verižnice. Na diagramu je s polno črto prikazana izračunana krivulja. Rdeča točka na x -osi predstavlja lego x_0 , s točkami pa so označene modelske vrednosti.

Ujemanje modelčka z idealno krivuljo je sicer ustrezno. Vidno pa je, da se je verižica (pri ohlapni skrbnosti avtorja) privzdignila v točki z malo manjšo vrednostjo od x_0 in da so tako tudi druge vrednosti pretežno rahlo višje od idealne krivulje, ki ustreza robnim pogojem, razen pri večjih višinah.

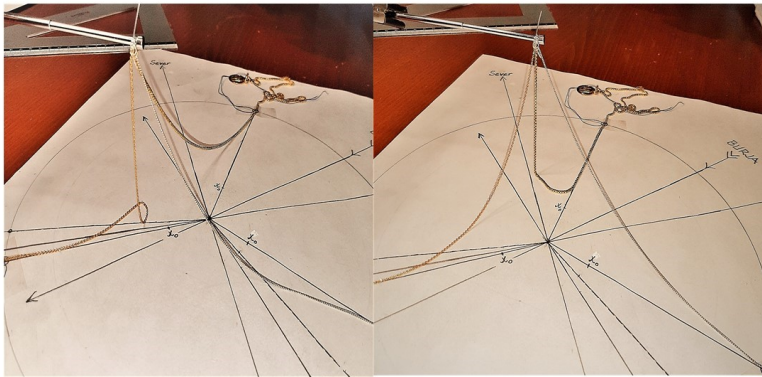
Na koncu pa prikazimo še realnejšo situacijo. Boja Vida je tritočkovno sidrana, žal so meritve plovcev na gladini z DGPS sistemom v mirnem vremenu pokazale, da so sidra od nje sicer oddaljena za okoli 33 m (z napako manjšo od 2 m), vendar kotna porazdelitev kar za več 10° odstopa od 120° porazdelitve enakostraničnega trikotnika. Če opazujemo eno verigo, potem jo v ravnovesju (mirnem vremenu) napenjata drugi dve verigi. Na sliki 3 vidimo porazdelitev treh verižnic, ki so pritrjene približno tako, kot so bile izmerjene lege sidrnih blokov boje Vide v mirnem vremenu.

Modelski pogled zaključimo z vpogledom položaja verig na boji Vidi v primeru, ko pihata burja (slika 4 levo) in jugo (slika 4 desno).

Sidrna veriga



Slika 3. Dva pogleda na model ravnovesne lege treh sidrnih verig v mirnem vremenu.



Slika 4. Modelska ponazoritev porazdelitve verig, ko na boji Vidi piha burja (levo) in ko piha jugo (desno).

Pričakovano je ob burji ohlapna tista »veriga«, ki je najbolj zahodno sidrana. Ta veriga od boje dokaj strmo pada, pri dnu pa veriga opiše vijugavo krivuljo. Drugi dve verigi sta bolj napeti; tista, ki je sidrana na jugovzhodni strani sicer pri dnu tudi opiše krivuljo, ki je pričakovano premaknjena proti zahodu, najbolj pa je napeta veriga, ki je sidrana v severovzhodni

smeri (približno med severno smerjo in burjo). V primeru južnega vetra pa je seveda najbolj ohlapna veriga, ki je bila pri burji najbolj napeta, drugi dve verigi sta lepo raztegnjeni, pod največjo napetostjo pa je veriga, ki je sidrana v jugovzhodni smeri.

Komentar in zaključna misel

Pri postavitvi modelčka z ženinimi verižicami je verjetno bila prisotna moteca zaskrbljenost, ki je ovirala skrbnejšo demonstracijsko postavitev. Lega »sidra« je zanesljivo nedoločena na nekaj mm, saj je bil del verižice, kjer bi naj bilo »sidro«, pritrjen na podlago z lepilnim trakom. Tolika je torej napaka pri ponazoritvi razdalje D , kar ustreza 0,5 m veliki napaki »v naravi« (od 33 m). Verižica ni bila povsem pri vertikalni steni škatle z mm papirjem, saj je visela na anteni tranzistorskega sprejemnika, pred končnim 3 mm »čepom« antene. Kljub trudu pri modelski ponazoritvi »idealne višine« $H (= 22/264 \text{ m} = 8,3 \text{ cm})$, je tudi tu napaka reda nekaj mm. Zgotovo je prisoten vpliv prostorske projekcije pri slikovnem odčitavanju oblike verižice na milimetrskem papirju.

Še komentarja pred zaključkom. Pod vodo je seveda teža potopljene verige reducirana za silo vzgona in je »rezultančna« (reducirana) teža $F_{gr} = g(m - m_v) = gV(\rho - \rho_v)$, kjer je V volumen verige, ρ_v gostota morske vode (okoli 1026 kg/m^3 pri temperaturi 20°C in slanosti 37) in ρ gostota železa, za katero iz tabel razberemo, da velja $\rho \geq 7750 \text{ kg/m}^3$. Če izberemo spodnjo mejo za gostoto železa, je teža verige v morski vodi približno za 13% manjša kot v zraku, oz. faktor zmanjšanja teže je 0,87, sicer pa vzgon preprosto upoštevamo, če za ta faktor reduciramo dolžinsko gostoto, ki tako postane $\mu = 22,0 \text{ kg/m}$.

Dodamo še misel o horizontalni komponenti sile. Iz (3) je $F_0 = a\mu g$ in iz podatka o dolžinski gostoti ter parametra a sledi ocena horizontalne sile verige $F_0 = 528,5 \text{ N}$, pri čemer smo za μ upoštevali reducirano dolžinsko gostoto zaradi vzgona. Tolikšna je v ravnovesju Vide približno horizontalna napetost vsake od verig. Kadar pa piha stalen veter, je seveda obremenitev verig (in sidra) bistveno spremenjena in tudi med njimi različna. S parametrom a je po (15) povezana točka dviga verige x_0 , ki se s korenem iz a zmanjšuje. Vendar je na dnu veriga seveda lahko tudi v zapleteni krivulji in je boljše merilo za povezavo med horizontalno silo in obliko verižnice dolžina dvignjenega dela verige, $L - x_0$, ki pa raste s korenem iz a . Od dveh enakih verig, ki sta pritrjeni na enaki višinski razliki, bo tista z večjo visečo dolžino napeta z večjo horizontalno silo. V primeru tritočkovnega sidranja pri stalnem vetru pa bi horizontalne sile lahko izveкли iz vektorskega ravnovesja

sil, pri čemer je ključna ravnovesna lega boje, kjer se tri verige »srečajo«. V divjem vremenu pa seveda lege boje še nismo odčitali, morda bomo prišli do kakšnih zaključkov v prihodnosti z analizo GPS pozicije, ki se na Vidi meri, v znanih vetrnih razmerah.

Eno verigo v točki $(x_0, 0)$ sila F_0 vleče proč od sidra, to vsaj deloma uravnoveša sila lepenja. Ko je veriga na mehkejšem dnu, so adhezijske sile pričakovano večje in ostaja odprto vprašanje, kolikšen je preostanek sile na sidro oz. sidrni blok, ko je ležeča veriga napeta. Večja ko bo vlečna sila, manjša bo oddaljenost x_0 raztegnjene verige od sidra, kjer se veriga vzpne. Za sidro pa je visoka maksimalna sila lepenja seveda zaželeno. Na trdi podlagi bo sila lepenja verige manjša in ko je F_0 večja od maksimalne sile lepenja, je v igri še sila lepenja na sidrnem bloku za zaustavitev pomikov že raztegnjene verige. Kadar pa se vlečna sila F_0 plavajočega telesa poveča oz. spremeni tudi po smeri (predvsem zaradi sile upora vetra ter sile valov in tokov), in ko celo veriga na dnu ni v iztegnjeni obliki, ampak je zamotana v obliki zank, pa pri pomikih verige po dnu stopi v igro sila trenja, ki je manjša od maksimalne sile lepenja. Zato so pomiki verige sunkoviti, v obliki zaporednih zdrsov, kar smo opazili tudi pri postavljanju modelčka in spreminjanju lege »boje«. Takrat je seveda bolje, da potapljača ni poleg boje Vide.

Iz danih vhodnih podatkov smo iteracijsko izračunali parameter verižnice a , posledično pa točko dviga verige nad dnom (na oddaljenosti 25,7 m od sidra, ko je pri dnu veriga raztegnjena) in tudi ravnovesno horizontalno silo v posamezni verigi na 528,5 N.

LITERATURA

- [1] I. N. Bronštejn, K. A. Semendjajev, G. Musiol in H. Muehlig, *Matematični priročnik*, Tehniška založba Slovenije, Ljubljana, 1997.
- [2] A. Likar, *Veriga in obok*, Presek, **18** (1990/1991), 3, 130–133.
- [3] M. Razpet, *Neka verižnica*, Obzornik mat. fiz. **59** (2012), 161–169.
- [4] M. Razpet, *Prava simetrična verižnica*, Obzornik mat. fiz. **56** (2009), 4, 121–133.
- [5] M. Razpet in N. Razpet, *Kvadratno kolo, verižnica in traktrisa*, Presek, **25** (1997/1998), 5, 294–299.
- [6] K. Veselić, *Verižnica – elementaren in celovit pristop*, Obzornik mat. fiz. **59** (2012), 6, 201–204.
- [7] *Catenary*, dostopno na <https://en.wikipedia.org/wiki/Catenary>, ogled 11. februarja 2022.
- [8] *Oceanografska boja*, dostopno na <http://www.nib.si/mbp/sl/oceanografski-podatki/buoy-2/general-2>, ogled 11. februarja 2022.
- [9] *The Catenary: Definition and Derivation*, dostopno na <https://youtu.be/16JI6Jz0zeI?t=7>, ogled 11. februarja 2022.