

Naslov članka/Article:

## Izstreljevanje namiznoteniške žogice s pomočjo vodnega topa

Ping Pong Ball Water Cannon Launcher

Avtor/Author:

Jure Šantej, Tjaš Esih, Alen Labohar, Mitja Suvajac

CC licenca



Priznanje avtorstva-Nekomercialno-Brez predelav



### Fizika v šoli 1/2024, letnik 29

ISSN 1318-6388

Izdal in založil: Zavod Republike Slovenije za šolstvo

Kraj in leto izdaje: Ljubljana, 2024

Spletna stran revije:

<https://www.zrss.si/strokovne-revije/fizika-v-soli/>

# Izstreljevanje namiznoteniške žogice s pomočjo vodnega topa

Jure Šantej<sup>1</sup>, Tjaš Esih<sup>1</sup>, Alen Labohar<sup>1</sup>, Mitja Suvajac<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Gimnazija Celje – Center

<sup>2</sup> Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Oddelek za fiziko

## Izvilleček

V prispevku predstavimo raziskavo izstreljevanja namiznoteniške žogice s pomočjo vodnega topa, ki je letošnji fizikalni problem na Turnirju mladih fizikov (YPT). Cilj tega fizikalnega problema je optimizirati mehanizem izstrelitve za doseg največje končne višine. V prispevku je razloženo, kako kapilarne sile vplivajo na izstrelitev žogice in kakšna je sestava eksperimentalnega okolja. Pri poskusu smo nadgradili svoje tehnike merjenja in analize podatkov z računalniškim programom Tracker. Rezultati eksperimenta so pokazali, da bo žogica dosegla največjo višino v posodi s srednjim premerom, ki jo bomo izpustili z najvišje začetne lege.

**Ključne besede:** YPT, vodni top, kapilarne sile, eksperiment, fizika

## Ping Pong Ball Water Cannon Launcher

### Abstract

The paper introduces a problem investigation of launching a ping pong ball using a water cannon, which is this year's problem at YPT. The objective is to optimise the launching mechanism to achieve the maximum final height. We explain how capillary forces affect the ball launch and the composition of the experimental environment. In the process, we enhanced our measuring and data analysis techniques using the Tracker computer programme. The results show that the ball will reach its maximum height in a medium-diameter container released from the highest launch position.

**Keywords:** YPT, water cannon, capillary forces, experiment, physics.

## 1 Uvod

Pri pripravi na Turnir mladih fizikov (angl. *Young Physicists' Tournament – YPT*) smo se srečali tudi s problemom izstreljevanja namiznoteniške žogice s pomočjo vodnega topa. YPT je tekmovanje, na katerem srednješolci tekmujejo v proučevanju, predstavitvi in preverjanju rezultatov vnaprej izbranih fizikalnih problemov [1].

Za tekmovanje se odločimo vsako leto, saj je eno izmed redkih v Sloveniji, ki nam omogoča tako eksperimentalno kot tudi teoretično raziskovanje na področju fizike. V letih smo razvili številne spretnosti na področju fizike, med drugimi smo usvojili tudi osnove programiranja, logičnega sklepanja, računalniškega modeliranja in merjenja. Ob vsem tem smo svoje znanje nadgradili tudi na področju hidrodinamike, kvantne fizike, mehanike, akustike, elektrike in magnetizma. Ker gre pogosto za realne in kompleksne fizikalne probleme, se področja marsikdaj tudi prepletajo, zato smo usvojili tudi znanje povezovanja različnih fizikalnih smeri.

Izmed sedemnajstih fizikalnih problemov, ki jih je za leto 2024 razpisal YPT, smo si med drugimi za problem izbrali tudi problem številka 5, ki se nanaša na izstrelitev namiznoteniške žogice s pomočjo vodnega topa [2]. Vodni top sestavlja žogica v posodi, napolnjeni z vodo, ki jo izpustimo z začetne višine. Ko posoda trči ob tla, izstrelimo namiznoteniško žogico v zrak. Za proučevanje tega problema smo se odločili zato, ker smo bili v preteklih letih že dejavni na področju hidrodinamike, med drugim smo se ukvarjali tudi z Marangonijevim pojavom [3] in fraktali v viskoznih tekočinah [4]. Problem nas je navdihnil tudi zaradi povezave med mehaniko in hidrodinamiko, ki pa je do zdaj še nismo obravnavali. Podoben problem je bil proučevan že na Turnirju fizikov (angl. *Physicists' Tournament – PT*) leta 2020, kjer je bil poudarek na samem mehanizmu pred izstrelitvijo. Mi pa smo se v okviru priprav na YPT usmerili na področje optimizacije celotnega sistema, da bo žogica dosegla največjo višino po izstrelitvi. Pri tem smo se osredotočili na parametra, ki zadevata višino začetne lege vodnega topa

in premer posode. Menimo, da bo žogica dosegla največjo višino pri najvišji začetni legi in pri posodi s srednjim premerom.

## 2 Teoretični model

Za lažje razumevanje in optimizacijo samega problema smo se najprej odločili, da bomo svoj problem teoretično razdelili na štiri faze. To so faza mirovanja (angl. *rest phase*), padanja (angl. *falling phase*), trka (angl. *collision phase*) in izstrelitve (angl. *jet phase*). Razdelitev kompleksnega problema nam je omogočila lažje razumevanje posamezne faze in s tem vpliva na samo izstrelitev, kar nam je pomagalo pri izoblikovanju teoretične napovedi izstrelitve žogice. Teoretična napoved ima pomanjkljivost, saj ne upošteva premera posode, ki vpliva na lego žogice v vodnem topu.



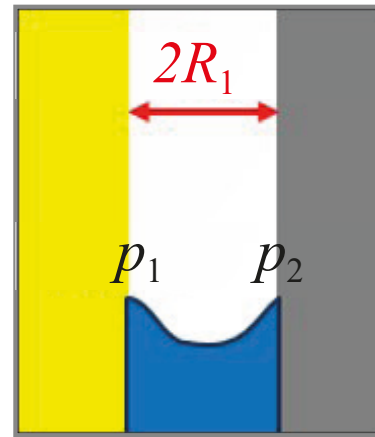
Slika 1: Vodni top, ki je sestavljen iz žogice v posodi z vodo.

### 2.1 Faza mirovanja

Faza mirovanja opisuje stanje žogice v posodi pred fazo padanja. V njej se žogica opazno premakne k steni. Ta pojav je posledica razlike med tlakoma na vodni površini, ki ju ustvarjata sama žogica in zrak. Ker gre hkrati za soodvisnost krivinskega radija, razlike v tlakih in površinske napetosti, smo za obrazložitev problema uporabili Young-Laplaceovo enačbo. Za svoj sistem smo izpeljali

$$\gamma = (p_1 - p_2)R_1, \quad (1)$$

kjer je  $\gamma$  površinska napetost vode,  $p_1$  tlak, ki ga ustvarja sila žogice na površino vode,  $p_2$  zračni tlak in  $R_1$  krivinski radij med steno in žogico. Ker je  $p_1$  večji od  $p_2$ , se ustvari gradient, ki kaže od območja z višjim tlakom na območje z nižjim. Zato se žogica premakne proti steni.



Slika 2: Shema vpliva tlakov na vodo. Rumeni pravokotnik prikazuje namiznoteniško žogico.  $p_1$  je tlak, ki ga ustvarja sila žogice na površino vode. Sivi pravokotnik prikazuje steno posode, vmesno modro polje pa vodo.  $p_2$  predstavlja zračni tlak tik nad površino vode.  $R_1$  prikazuje krivinski radij površine vode med žogico in steno posode.

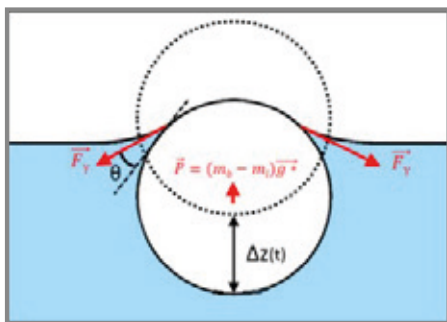
### 2.2 Faza padanja

Faza padanja opisuje stanje žogice med padanjem vodnega topa z žogico v njem do trenutka, ko vodni top udari ob tla. Situacijo opišemo v pospešenem koordinatnem sistemu, v katerem padajoča cev miruje. Če za opis sil na žogico v posodi med padanjem uporabimo drugi Newtonov zakon, ugotovimo, da se žogica med padanjem začne rahlo potapljati zaradi površinske napetosti vode, ki privede do kapilarnega delovanja. Kapilarno delovanje je pojav tekočine, ki teče v ozkem prostoru v nasprotju z zunanji silami, kot je gravitacija, ali vsaj brez njihove pomoči [5]. Za svoj sistem, v katerem je pozitivna smer usmerjena v smer padanja, smo ugotovili, da je rezultanta vseh zunanjih sil na žogico

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \vec{F}_g + \vec{F}_s + \vec{F}_\mu + \vec{F}_\gamma, \quad (2)$$

kjer je  $\vec{F}_g$  sila teže žogice,  $\vec{F}_s$  sistemska sila na žogico [6],  $\vec{F}_\mu$  sila zaradi viskoznosti in  $\vec{F}_\gamma$  sila zaradi površinske napetosti na žogico. V primeru prosto padajoče cevi, v kateri je žogica zunanji (inercialni) opazovalec, ugotovimo, da na cev in žogico deluje sila teže, zato se gibljeta pospešeno s težnim pospeškom. V opazovanem sistemu, ki je zvezan s cevjo, pa moramo poleg »pravih« sil upoštevati tudi sistemsko silo, ki ravno kompenzira silo teže [6], posledično dobimo navidežno breztežnostno stanje žogice, kjer velja, da je  $\vec{F}_g + \vec{F}_s = 0$ , saj žogica v takem koordinatnem sistemu miruje. Med padanjem torej na žogico delujeta le  $\vec{F}_\gamma$  in  $\vec{F}_\mu$ , pri čemer je  $\vec{F}_\mu$  zaviralna sila.  $\vec{F}_\mu$  deluje podobno kot sila trenja pri trenju med gibajočimi trdnimi snovmi in pretvarja kinetično energijo v notranjo energijo [7].  $\vec{F}_\mu$  zavira samo potapljanje žogice zaradi močne strižne napetosti, ki ji nasprotuje potapljanje žogice.  $\vec{F}_\gamma$  je sila zaradi površinske napetosti

in teži k stanju, pri katerem imajo tekočine v mirovanju najmanjšo mogočo površino [8].  $\vec{F}_\gamma$  omogoči začetek potapljanja žogice, saj se zaradi nje gladina vode, ki omoči steno žogice, ob robu žogice zakrivi navzgor in se dvigne (kapilarni dvig). Kapilarnost je pojav, ki nastane zaradi površinske napetosti na površini vode. Kapljevina omoči steno posode, če je mejni kot, tj. kot med tangento na gladino vode in žogico, med  $0$  in  $90^\circ$  [9]. V našem primeru je mejni kot  $\theta$  enak  $50,6^\circ$ . Žogica doseže končno globino v vodi zaradi kapilarnega delovanja, ko se vzpostavi ravnovesje sil med  $\vec{F}_\gamma$  in  $\vec{F}_\mu$ . Globina žogice postane pomembna v fazi trka, saj se pri trku začne žogica v izbranem koordinatnem sistemu premikati pospešeno (rezultanta sil ni več enaka  $0$ ). Ker se žogica med padanjem deloma potopi, ob trku nanjo deluje večja sila vzgona kot na gladini.



**Slika 3:** Model vpliva sil na žogico v posodi.  $\theta$  je mejni kot med vodno površino in žogico,  $\Delta z$  predstavlja spremembo pozicije iz mirovanja (črtan krog) in pozicijo žogice med fazo padanja (neprekinjen krog),  $\vec{P}$  je sila vzgona na žogico in  $\vec{F}_\gamma$  sila zaradi površinske napetosti. Povzeto po [10].

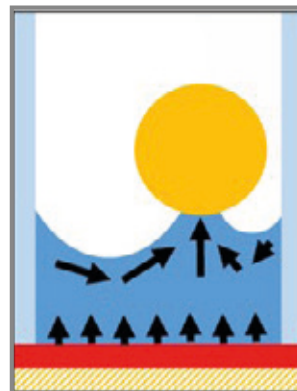
### 2.3 Faza trka

Faza trka opisuje dogajanje z žogico, ko posoda trči ob tla. Takrat se zaradi sunka sile tal na sistem celotnemu sistemu spremeni gibalna količina ( $\Delta \vec{G} = \vec{F} \Delta t$ ). Trk traja le nekaj desetink sekunde, zato na sistem deluje velika sila tal, ki v primeru, da je dno posode poravnano s tlemi, kaže v smer navpično navzgor. V isto smer kaže tudi rezultanta sil na žogico, posledično pa tudi pospešek  $\vec{a}$ , ki je mnogo večji od  $\vec{g}$ , zato se sistem začne premikati navzgor. Če v tej fazi uporabimo za žogico drugi Newtonov zakon, dobimo

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = m\vec{a} = \vec{F}_\mu + \vec{F}_\gamma + \vec{F}_g + \vec{P} + \vec{F}_c, \quad (3)$$

kjer je  $\vec{F}_\mu$  sila zaradi viskoznosti,  $\vec{F}_\gamma$  sila zaradi površinske napetosti,  $\vec{F}_g$  sila teže žogice,  $\vec{P}$  sila vzgona in  $\vec{F}_c$  sila vodnega curka [11]. V tej fazi postaneta  $\vec{F}_\gamma$  in  $\vec{F}_\mu$  zaviralni sili.  $\vec{F}_\mu$  zavira gibanje žogice med dviganjem skozi vodo,  $\vec{F}_\gamma$  pa ga zavira v trenutku, ko želi žogica prebiti površino vode. Torej žogico v navpični smeri pospešujeta  $\vec{P}$  in  $\vec{F}_c$ .  $\vec{P}$  pospeši žogico zaradi  $\vec{a}$  in njene potopitve v vodo ( $\Delta z$ ).

$\vec{F}_c$  še dodatno pripomore žogici pri izstrelitvi navzgor, saj se zaradi cilindrične oblike posode vsi tokovi, ki nastanejo ob trku, zaradi razlik v tlakih usmerijo proti sredini posode. Ker se žogica že v fazi mirovanja zaradi površinske napetosti odmakne od sredine, je učinek curka manjši, kar je eden od razlogov za odstopanje eksperimentalno pridobljenih rezultatov od teoretične napovedi.



**Slika 4:** Model žogice tik pred izstrelitvijo. Na njem so vidne tokovnice, ki prikazujejo tokove, ki nastanejo ob trku sistema s tlemi. Povzeto po [12].

### 2.4 Faza izstrelitve

Faza izstrelitve opisuje gibanje žogice po izstrelitvi iz vode. Ko se žogica loči od vode, pridobi začetno kinetično energijo  $W_k$  kot posledico delovanja rezultante sil (3) na žogico. Za premikajočo se žogico v zraku velja izrek o kinetični in potencialni energiji

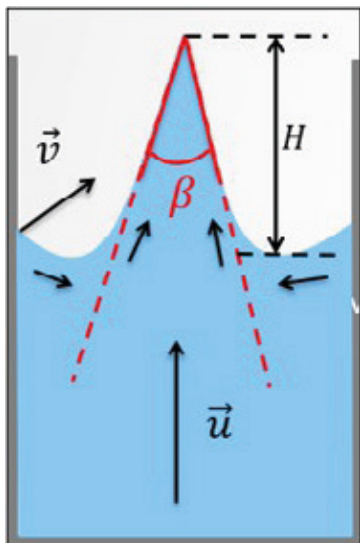
$$\Delta W_k + \Delta W_p = A, \quad (4)$$

kjer je  $\Delta W_k$  sprememba kinetične energije žogice,  $A$  delo vseh zunanjih sil na žogico, razen sile teže, in  $\Delta W_p$  sprememba potencialne energije žogice. Zunanja sila je sila zračnega upora ( $\vec{F}_u$ ) na žogico, ki deluje v nasprotni smeri gibanja žogice. Žogica tako doseže najvišjo lego, ko njena kinetična energija pade na nič.

### 2.5 Teoretična napoved

Na podlagi posameznih faz smo izoblikovali svojo teoretično napoved, ki pa ima pomanjkljivost, saj pri njej nismo upoštevali samega premera posode. Pri teoretični napovedi izstrelitve smo privzeli, da se vodni curek, vrh katerega je žogica, izoblikuje v obliko stožca. Na podlagi rezultatov, ki so jih dobili ruski študentje, ugotovimo, da sta končna višina žogice ( $h$ ) in začetna višina sistema ( $h_0$ ) povezani prek izstrelitvenega koeficienta ( $k$ ). Ta pa je znotraj stožca definiran kot  $\sqrt{k} = \cot \frac{\beta}{2}$ , kjer je  $\beta$  kot ob vrhu stožca.  $k$  ob poenostavitvi povezuje hitrost pretoka vode ( $\vec{u}$ ) in vodoravno komponento hitrosti vode na gladini ( $\vec{v}_x$ ) prek Pitagorovega izreka. Za izračun  $h$  so privzeli, da je hitrost žogice, ko zapusti sistem, enaka  $\vec{u}$ .

Na podlagi tega sklepa so za določitev  $h$  vpeljali enačbo,  $h = \frac{u^2}{2g}$ . Od tod sledi enačba  $k = (\cot \frac{\beta}{2})^2 = (\frac{u}{v_x})^2$  [12], iz katere smo lahko izračunali, da je pri naših pogojih  $k$  enak vrednosti 3.69.



**Slika 5:** Model izstrelitvenega curka v obliki stožca, kjer je  $H$  višina stožca,  $\vec{u}$  hitrost vodnega toka,  $\vec{v}$  vodoravna komponenta hitrosti vode na gladini in  $\beta$  kot ob vrhu stožca.

Pri napovedi smo upoštevali tudi globino, ki jo žogica pridobi zaradi kapilarnega delovanja, ki smo jo v končno napoved vpeljali prek enačbe, ki so jo ruski študentje pridobili eksperimentalno,  $d = d_{\max}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$ , kjer je  $d$  globina potopljene žogice,  $d_{\max}$  maksimalna mogoča globina potopitve,  $t$  čas padanja in  $\tau$  časovni parameter, ki je bil na podlagi meritev določen na vrednost 0,25 s [12]. Iz dane enačbe smo izpeljali  $t$ , ki smo ga vstavili v enačbo  $t = \sqrt{\frac{2h_0}{g}}$ . Iz te povezave smo nato izpeljali enačbo

$$h_0 = \frac{g\tau^2 \left( \ln \left( 1 - \frac{d}{d_{\max}} \right) \right)^2}{2}, \quad (5)$$

iz katere smo nato ob vpeljavi zgoraj ugotovljene povezave  $h = kh_0$  izpeljali, da velja

$$h = \frac{kg\tau^2 \left( \ln \left( 1 - \frac{d}{d_{\max}} \right) \right)^2}{2}. \quad (6)$$

### 3 Eksperiment

Eksperiment smo želeli zastaviti tako, da bo mogoče proučiti čim več parametrov. Tako smo svoje eksperimentalno orodje razdelili v dve skupini, na eksperimentalno opremo in merilno opremo. Za eksperimentalno opremo se upošteva vsa oprema, ki smo jo uporabili za izvedbo eksperimenta. Za merilno opremo se upošteva vsa oprema, ki smo jo uporabili pri opravljanju meritev danega eksperimenta in za analizo izmerjenih podatkov.

#### 3.1 Eksperimentalna oprema

Kot dele eksperimentalne opreme smo uporabili leseno ploščo, lesene palice, laser, namiznoteniško žogico in posode različnih premerov. Iz lesene plošče, lesenih palic in laserja smo postavili osnovno eksperimentalno ploščad, na kateri smo izvajali eksperimente. Za oblikovanje eksperimentalne ploščadi z leseno ploščo na dnu smo se odločili, ker smo s tem zagotovili isti koeficient prožnosti materiala ob vsakem trku. Lesene palice so nam služile kot merilne skale za odčitavanje začetne višine. Ker pa je na trenutke zaradi oddaljenosti palic nastala težava pri odčitavanju, smo na palico namestili še premični laser, ki je izboljšal odčitavanje začetne višine.

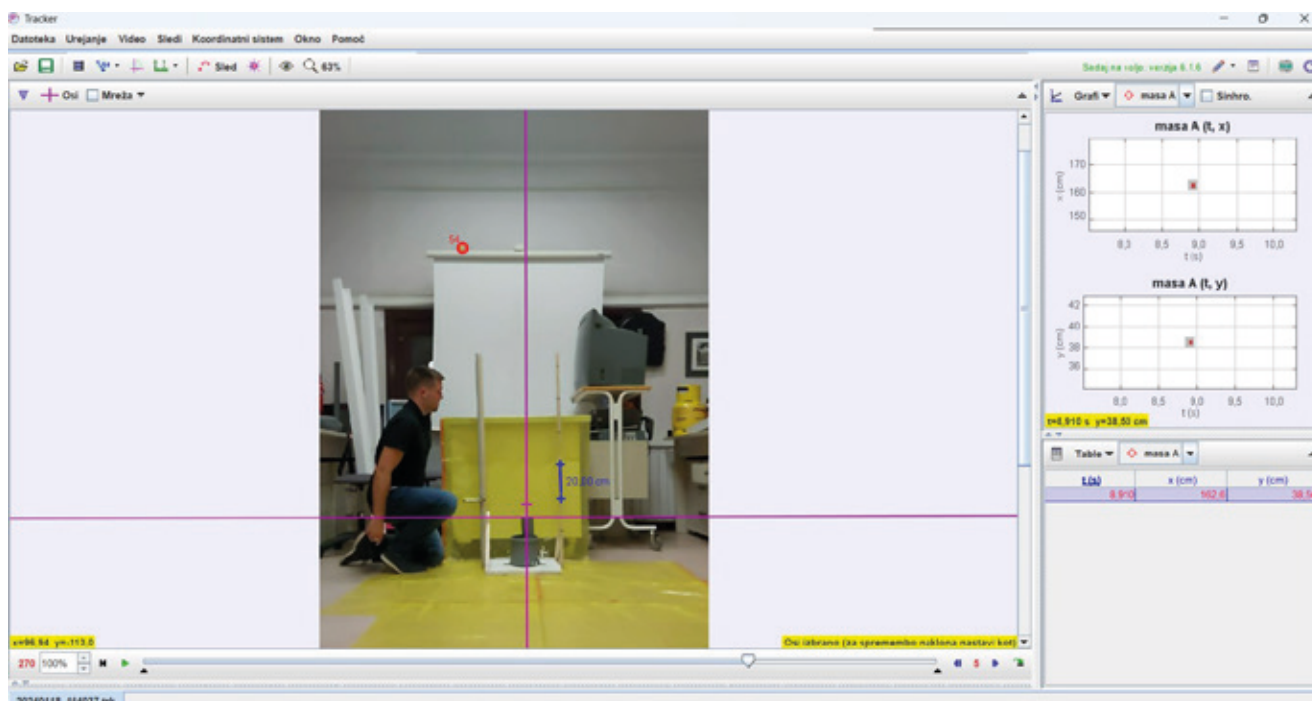
Pri vseh ponovitvah eksperimenta smo uporabili isto namiznoteniško žogico, saj smo s tem zagotovili enak mejni kot med površino žogice in gladino vode. Z uporabo iste namiznoteniške žogice smo zagotovili tudi enako maso žogice, 2,8 g, enak premer žogice, 4,2 cm, enak volumen žogice, 37,2 cm<sup>3</sup>, in s tem tudi enako gostoto žogice, 0,075  $\frac{g}{cm^3}$ . Vse štiri količine imajo neposredno ali posredno vlogo pri izstrelitvi. Z različnimi premeri posod z istimi prostorninami vode smo želeli eksperimentalno raziskati, ali premer posode vpliva na samo izstrelitev žogice. V ta namen smo uporabili tri posode z različnimi premeri: 5,0; 7,6 in 11,6 cm.



**Slika 6:** Eksperimentalna ploščad z leseno osnovno ploščo, lesene palice z merilno skalo in premični laser za lažje odčitavanje višine.

#### 3.2 Merilna oprema

Kot dele merilne opreme smo uporabili visokohitrostno kamero, kljunasto merilo, tehtnico, merilno posodo s skalo 0,5 l ter programa Tracker in Excel. Visokohitrostno kamero smo uporabili za natančno snemanje izstrelitve žogice, saj smo tako lažje opazovali njeno gibanje. Kamero smo stacionirali 2,5 m od same eksperimentalne ploščadi, saj smo s tem povečali snemalni prostor, hkrati pa se izognili tudi morebitni paralaksi. Kakovostni in natančni posnetki so nam nato omogočili lažjo obdelavo



Slika 7: Proučevanje končnih višin žogice s pomočjo programa Tracker.

podatkov s pomočjo programa Tracker. Kljunasto merilo smo uporabili pri meritvi premera posod in žogice. Za merjenje lastnosti žogice smo tako uporabili tudi tehtnico. S pomočjo merilne posode s skalo 0,5 l smo lažje odmerjali količino vode v posodo. S tem smo zagotovili večjo ponovljivost eksperimenta, saj smo lahko pri vsaki ponovitvi uporabili enako količino vode. Programa Tracker in Excel sta nam nato služila pri obdelavi posnetkov. S pomočjo programa Tracker smo določili končne višine žogice v ustreznem merilu. Te podatke smo nato vnesli v program Excel, v katerem smo potem izrisali grafe glede na pridobljene podatke.

### 3.3 Neodvisne in odvisne spremenljivke

Na podlagi teoretičnih napovedi, postavitve eksperimentalnega okolja in ideje fizikalnega problema smo se odločili, da si za začetek izberemo dve neodvisni spremenljivki in eno ključno odvisno spremenljivko. Za neodvisni spremenljivki smo pri eni vrsti eksperimenta določili začetno višino posode, pri drugi pa premer posode. Pri eksperimentu, kjer smo spreminjali začetno višino, sta bila pri vseh ponovitvah eksperimenta premer posode in količina vode v njej enaka. Pri eksperimentu, kjer smo spreminjali premer posode, pa sta bili količina vode v posodi in začetna višina posode, s katere smo jo spustili, konstantni. Odvisna spremenljivka je bila pri obeh eksperimentih končna višina žogice, saj je naš osnovni cilj le-to optimizirati.

## 4 Rezultati

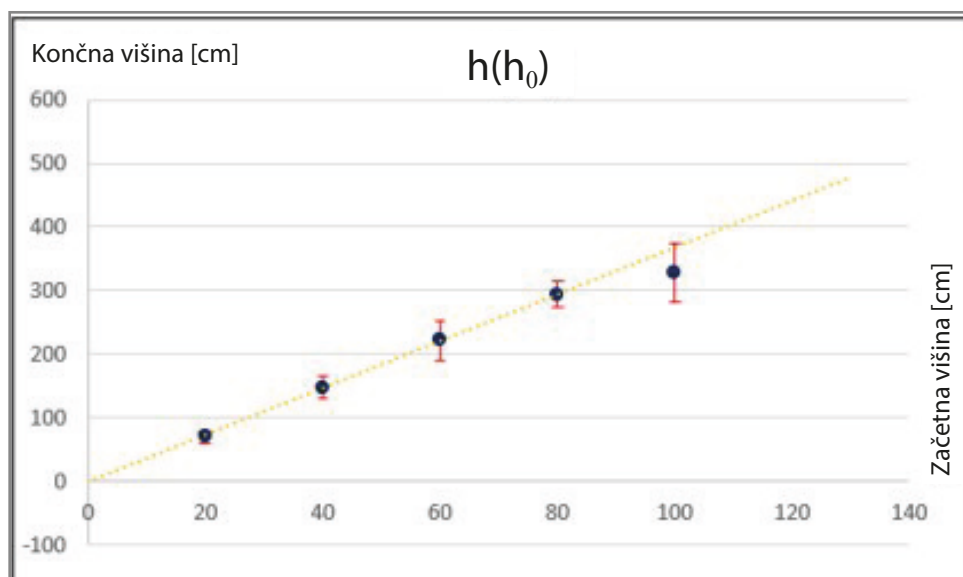
Najprej bomo predstavili rezultate, ki smo jih pridobili s spuščanjem vodnega topa z različnih začetnih višin pri konstantnem volumnu vode 1 l in pri stalnem premeru posode 7,6 cm. Za začetne višine posode smo v danem eksperimentu vzeli višine 20 cm, 40 cm, 60 cm, 80 cm in 100 cm. Vsako meritev smo ponovili desetkrat, saj smo s tem zagotovili večjo natančnost meritve. Spodnji graf (Slika 8) prikazuje rezultate eksperimenta v primerjavi s teoretično napovedjo končne višine.

Z grafa je mogoče razbrati, da se z večanjem začetne višine sistema večja tudi vrednost končne višine žogice. Vendar se pri večjih začetnih višinah končne višine začnejo razlikovati od naše teoretične napovedi. Razlog za to je najverjetneje neupoštevanje premera posode pri teoretični napovedi končne višine. Od tod lahko sklepamo, da je naša teoretična napoved za končno višino uporabna le do začetne višine 100 cm, saj ima pri tej in vseh večjih začetnih višinah premer posoda že prevelik vpliv na končno višino žogice, da bi jo lahko z uporabo naše teoretične napovedi natančno določili. Premer posode vpliva na pozicijo žogice pred izstrelitvijo, saj se zaradi povečanja krivinskega radija med žogico in steno poveča tudi gradient, ki povzroči, da se žogica odmakne od centralne lege. Posledično tudi  $\vec{F}_c$  manj vpliva na samo žogico, saj curek nastane v sredini, žogica pa je od sredine odmaknjena. Rezultati grafa so torej potrdili naše predvidevanje, da bo žogica dosegla najvišjo končno lego pri najvišji začetni legi, vendar pa je postalo razvidno, da je naš model pomanjkljiv, saj ne vključuje premera posode.

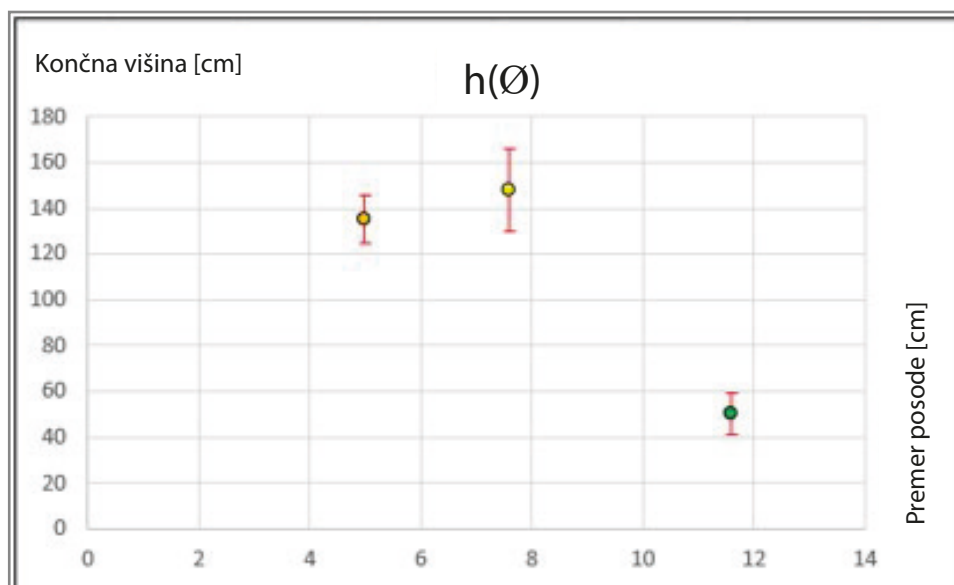
Nadaljujemo s predstavitvijo rezultatov, ki smo jih pridobili s spuščanjem posod z različnimi premeri z enake začetne višine sistema 40 cm in pri enaki prostornini vode 1 l. Pri eksperimentu smo uporabili tri posode različnih premerov: 5,0, 7,6 in 11,6 cm. Vsako meritev smo ponovili desetkrat, saj smo s tem povečali njeno natančnost.

Spodnji graf (Slika 9) prikazuje rezultate našega eksperimenta brez primerjave teoretične napovedi, saj samega premera posode v napovedi nismo upoštevali.

Z grafa je mogoče razbrati, da bomo največjo končno višino dosegli pri posodi s srednjim premerom, najmanjšo končno višino pa pri posodi z največjim premerom. Pri posodi z najmanjšim premerom bomo dosegli vmesno končno višino, kar ovrže naše predvidevanje, da bomo največjo končno višino dosegli pri posodi z najmanjšim premerom. Razlog za to je najverjetneje to, da sta premer žogice in premer posode primerljiva (premer žogice je 4,2 cm, premer posode je 5,0 cm), kar onemogoči učinek kapilarnega delovanja in privede do manjše globine.



**Slika 8:** Graf končne višine žogice v odvisnosti od začetne višine sistema. Z modrimi točkami so predstavljene povprečne vrednosti za posamezno začetno višino. Rdeče črte čez modre točke predstavljajo absolutno mersko napako za posamezno povprečno vrednost meritve. Rumena črtkana črta prikazuje teoretično napoved meritve v zgoraj opisanih eksperimentalnih pogojih.



**Slika 9:** Graf končne višine žogice v odvisnosti od premera posode pri enaki začetni višini 40 cm. Z oranžno točko je označena povprečna končna višina za posodo s premerom 5,0 cm, z rumeno točko je označena povprečna končna višina za posodo s premerom 7,6 cm, z zeleno točko pa je označena povprečna končna višina za posodo s premerom 11,6 cm. Rdeče črte na posamezni točki predstavljajo absolutno mersko napako za posamezno povprečno vrednost.

Zato na žogico deluje manjša sila vzgona kot pri posodi s premerom 7,6 cm. Pri posodi z največjim premerom žogica doseže najmanjšo končno višino, kar je najverjetneje posledica prevelikega premera posode, zaradi katerega se žogica odmakne od središča posode. Posledično na žogico deluje tudi manjša sila curka, zato žogica doseže tudi manjšo končno višino.

Rezultati eksperimentov so torej pokazali, da bo žogica dosegla največjo končno višino v situaciji, ko bomo žogico izstrelili s pomočjo srednje posode, 7,6 cm, pri največji začetni višini sistema, v našem primeru z višine 100 cm.

## 5 Zaključek

V članku smo na začetku na kratko predstavili zgodovino tekmovanja YPT v Sloveniji, ki se ga udeležujemo vsako leto [1]. V krajšem razmisleku smo nato predstavili tudi nekaj fizikalnih spretnosti in veščin, ki smo jih pridobili z leti. Nato smo začeli analizirati problem izstrelitve namiznoteniške žogice s pomočjo vodnega topa, ki smo si ga letos izbrali za enega izmed fizikalnih problemov za YPT.

V nadaljevanju smo teoretično razdelili fizikalni problem na posamezne faze. Razložili smo, kako se v prvi fazi žogica zaradi površinske napetosti približa steni. Razložili smo, zakaj se v drugi fazi začne žogica potapljati in kako to vpliva na izstrelitev v tretji fazi. Razložili smo, kako udarec ob tla v tretji fazi ustvari vodni curek in kako ta pripomore pri sami izstrelitvi žogice. Razložili pa smo tudi, kdaj žogica v zadnji fazi doseže končno višino. Po predstavitev posameznih faz smo predstavili svojo teoretično napoved končne višine in svoje

eksperimentalno orodje. Pri eksperimentalni opremi bi izpostavili leseno dno, saj smo s tem v eksperimentu zagotovili enak prožnostni koeficient trka v vseh ponovitvah poskusa. Pri merilni opremi pa bi posebej omenili računalniški program Tracker, ki nam je omogočil lažjo obdelavo meritev. Določili smo tudi neodvisni spremenljivki, ki sta bili pri našem eksperimentu začetna višina sistema in premer posode, in odvisno spremenljivko, ki je bila v vseh izvedbah končna višina žogice. Na koncu smo predstavili še rezultate svojega eksperimenta. Najprej tistega, pri katerem smo spreminjali začetno višino in kjer so rezultati pokazali, da bo žogica dosegla največjo končno višino pri največji začetni višini sistema, kar se ujema z našo predpostavko. Nato pa smo predstavili še rezultate eksperimenta, pri katerem smo spreminjali premer posode, kjer so rezultati pokazali, da je žogica dosegla največjo končno višino pri posodi s srednjim premerom, kar je ovrglo našo predpostavko, da bo žogica največjo višino dosegla pri posodi z najožjim premerom. Iz rezultatov smo izpeljali sklep, da bo žogica dosegla največjo končno višino, če bo izstreljena iz posode s srednjim premerom posode in z najvišje začetne lege sistema.

V nadaljevanju želimo pri samem eksperimentu izboljšati svojo teoretično napoved končne višine žogice, tako da bomo pri napovedi upoštevali tudi premer posode in s tem poskusili napovedati, kako geometrijska oblika posode vpliva na končno višino. V veselje in zadovoljstvo nam bo, če bo ta članek navdušil bralce za morebitno udeležbo na Slovenskem turnirju mladih fizikov (angl. *Slovenian Young Physicists' Tournament – SiYPT*) ter na splošno za raziskovanje in razvijanje na področju eksperimentalne fizike in s tem povečal tudi zanimanje za fiziko v osnovnih in srednjih šolah po Sloveniji.

## Viri in literatura

- [1] Faletič, S. (2018). Kaj pa en YPT v razredu? *Fizika v šoli*, 23 (1), 2–9.
- [2] <https://www.iypt.org/problems/problems-iypt-2024/> (25. 2. 2024).
- [3] Keiser, L., Bense, H., Colinet, P., Bico, J., in Reyssat, E. (2017). Marangoni Bursting: Evaporation-Induced Emulsification of Binary Mixtures on a Liquid Layer. *Phys. Rev. Lett.* 118, 074504.
- [4] Harkai, S. (2014). *Difuzijsko omejena agregacija*. Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Univerza v Mariboru, Maribor.
- [5] [https://en.wikipedia.org/wiki/Capillary\\_action](https://en.wikipedia.org/wiki/Capillary_action) (26. 2. 2024).
- [6] Strnad, J. (1977). *Fizika*, 1. del (str. 60–61). Ljubljana: DZS.
- [7] Strnad, J. (1979). *Leksikon Cankarjeve založbe FIZIKA* (str. 242). Ljubljana: Cankarjeva založba.
- [8] Strnad, J. (1977). *Fizika*, 1. del (str. 121–125). Ljubljana: DZS.
- [9] Strnad, J. (1979). *Leksikon Cankarjeve založbe FIZIKA* (str. 99). Ljubljana: Cankarjeva založba.
- [10] Barlet, A., Malhomme, N. (2022). Suction-ejection of a ping-pong ball in a falling water-filled cup. *Emergent Scientist* 6, 2.
- [11] Kladnik, R. (2005). *Fizika za srednješolce 1. del – Gibanje, sila in snov* (str. 35–36). Ljubljana: DZS.
- [12] <https://zenodo.org/records/4307817> (26. 2. 2024).