

58. srečanje mladih raziskovalcev Slovenije 2024

Nihanje med padanjem kapljic

Raziskovalna naloga

Raziskovalno področje: Fizika in astronomija

Avtorja: Gloria Capl

Ana Smiljan

Mentor: Peter Gabrovec



Maribor, april 2024

VSEBINA

Vsebina	I
Kazalo slik	III
Kazalo tabel	III
Kazalo grafov	III
Povzetek	III
Zahvala.....	V
1 Uvod.....	1
2 Metodologija dela	2
2.1 Metoda Du Noüy obroča.....	2
2.2 Metoda video analize	3
2.3 Spreminjanje polmera	4
2.4 Spreminjanje površinske napetosti	4
2.5 Spreminjanje višine.....	6
3 Teoretični del	7
3.1 Nihanje kapljice	7
3.2 Prosti pad	8
3.3 Tekočine.....	9
3.4 Površinska napetost.....	9
3.5 Struktura in sestava detergenta	12
4 Rezultati	13
4.1 Računanje frekvence pri različnih polmerih	13
4.2 Merjenje frekvence pri različnih polmerih	14
4.3 Primerjava izmerjenih in izračunanih vrednosti	15
4.4 Iskanje zveze med polmerom in frekvenco	17

4.5	Dokaz, da višina ne vpliva na frekvenco	19
4.6	Faktor raztega kapljice	20
4.7	Računanje frekvence pri različnih površinskih napetostih	21
4.8	Iskanje zveze med frekvenco in površinsko napetostjo	27
5	Razprava	29
5.1	Odvisnost frekvence nihanja kapljice od dejavnikov prisotnih med padcem	29
5.2	Izvedba poskusa s preprostimi, vsakdanjimi pripravami	30
5.3	Analiza raztega kapljice	31
6	Zaključek in sklepi	32
7	Viri in literatura	33
8	Viri slik	35
9	Priloga	
9.1	Priloga 1	
9.2	Priloga 2	
9.3	Priloga 3	
9.4	Priloga 4	

KAZALO SLIK

SLIKA 1: METODA OBROČA DU NOÜY (LASTEN VIR)	2
SLIKA 2: MERJENJE PREMERA S POMOČJO VIDEO ANALIZE (LASTEN VIR)	3
SLIKA 3: IGLE RAZLIČNIH PREMEROV (LASTEN VIR)	4
SLIKA 4: UČINKI POVRŠINSKE NAPETOSTI (LASTEN VIR)	5
SLIKA 5: PADEC KAPLJICE Z VIŠINE 35 CM (LASTEN VIR)	6
SLIKA 6: SILE MED MOLEKULAMI VODE (LIBRETEXTS CHEMISTRY, 2020)	10
SLIKA 7: KEMIJSKA SESTAVA DETERGENTA (LEARNING, 2020)	12
SLIKA 8: MERJENJE RAZTEGA KAPLJICE V APLIKACIJI LOGGER PRO (LASTEN VIR)	20
SLIKA 9: PRIKAZ SIL POVRŠINSKE NAPETOSTI NA OBROČ PRI DU NOÜY OBROČA METODI (LASTEN VIR)	21
SLIKA 10: OBROČ V OBLIKI ZVEZDE (LASTEN VIR)	21
SLIKA 11: PRIKAZ POSTOPKA METODE (LASTEN VIR)	22
SLIKA 12: SILOMER (LASTEN VIR)	22
SLIKA 13: PRIKAZ GRAFA SILE POVRŠINSKE NAPETOSTI IZ VERNIER GRAPHICAL ANALYSIS (LASTEN VIR)	23

KAZALO TABEL

TABELA 1: POVRŠINSKE NAPETOSTI RAZLIČNIH TEKOČIN (OPENPROF, 2024)	11
TABELA 2: VREDNOSTI FREKVENCE PRI DOLOČENEM POLMERU	13
TABELA 3: IZRAČUNANI KOEFICIENTI IN NJIHOVO ODSTOPANJE OD POVPREČNE VREDNOSTI	14
TABELA 4: POLMERI IN IZMERJENE FREKVENCE PRI DANEM POLMERU	15
TABELA 5: PRIMERJAVA IZMERJENIH IN IZRAČUNANIH FREKVENC	15
TABELA 6: PRIMERJAVA IZMERJENIH IN IZRAČUNANIH FREKVENC SKUPAJ Z NAPAKAMI	16
TABELA 7: REZULTATI IZRAČUNANIH FREKVENC IN NJIHOVE NAPAKE PRI RAZLIČNIH POVRŠINSKIH NAPETOSTIH.	24
TABELA 8: IZMERJENI NIHAJNI ČASI PRI RAZLIČNIH KONCENTRACIJAH MILNICE Z NAPAKAMI MERITEV.....	25
TABELA 9: REZULTATI IZRAČUNANIH IN IZMERJENIH FREKVENC PRI RAZLIČNIH POVRŠINSKIH NAPETOSTIH IN NJIHOVE NAPAKE	26

KAZALO GRAFOV

GRAF 1: GRAF MERJENE FREKVENCE (RDEČA) IN IZRAČUNANE FREKVENCE (MODRA) V ODVISNOSTI OD POLMERA (LASTEN VIR).....	17
GRAF 2: LINEARIZIRAN GRAF IZMERJENE FREKVENCE (RDEČA) IN IZRAČUNANE FREKVENCE (MODRA) V ODVISNOSTI OD POLMERA (LASTEN VIR)	18
GRAF 3: GRAF FREKVENCE V ODVISNOSTI OD VIŠINE (LASTEN VIR)	19
GRAF 4: IZRAČUNANE (MODRE) IN IZMERJENE (RDEČE) FREKVENCE V ODVISNOSTI ON POVRŠINSKE NAPETOSTI (LASTEN VIR)	27
GRAF 6: LINEARILIZIRANI GRAF FREKVENC V ODVISNOSTI OD POVRŠINSKE NAPETOSTI (LASTEN VIR)	28

POVZETEK

Namen raziskovalne naloge je bil, natančneje raziskati vsakodnevni pojav, kateremu ljudje ne namenjajo veliko časa in ne vedo, kaj se pravzaprav med pojmom dogaja. Raziskovali smo padec kapljice in vse možne dejavnike, ki so prisotni ob samem pojavi.

Zanimala nas je predvsem površinska napetost, glavni dejavnik, ki povzroča nihanje kapljice. Pri merjenju te količine smo si pomagali z nam novo metodo – metoda obroča Du Noüy. Merili smo največjo silo, ki je potrebna za ločitev obroča od vode oz. ostalih tekočin. Površinsko napetost smo spremajali z dodajanjem detergenta in nato opazovali, kako se frekvenca kapljice spremeni pri različnih površinskih napetostih.

Ker smo predpostavili, da je frekvenca nihanja odvisna tudi od premera kapljice, smo uporabili medicinske igle z različnimi premeri in opazovali padec različno velikih kapljic. Ugotovili smo, da manjša kot je kapljica, z večjo frekvenco niha.

Preverili smo tudi, kakšna je odvisnost frekvence od višine, s katere spustimo kapljico. Po nekaj poskusih smo ugotovili, da je višina dejavnik, ki na frekvenco nihanja ne vpliva.

KLJUČNE BESEDE: nihanje kapljic, frekvenca nihanja, površinska napetost, vsakodnevni fizikalni pojav, preproste priprave, video analiza.

ZAHVALA

Posebej bi se radi zahvalili najinemu mentorju, za vzpodbudo in pomoč pri izvajanju poskusov in pisanju raziskovalne naloge. Zahvala gre tudi našemu laborantu, ki nama je priskrbel vse pripomočke za izvedbo poskusa in pomagal, da je le-ta stekel brez zapletov.

1 UVOD

Padec vodne kapljice je znan pojav, s katerim se ljudje srečujemo vsakodnevno, ker pa pojave ne opazujemo dovolj natančno, po navadi ne opazimo podrobnosti, ki se med samim pojavom zgodijo. Glavni dejavnik, zaradi katerega voda tvori značilno obliko kapljice, je površinska napetost in sile med molekulami vode. Zaradi površinske napetosti kapljica med padcem niha, oziroma spreminja obliko, in sicer iz podolgovatega v sploščeni sferoid in obratno. Kapljica niha z določeno frekvenco, ki je odvisna od določenih fizikalnih dejavnikov, prisotnih ob pojavi.

Namen naše raziskovalne naloge je bil raziskati padec kapljice bolj podrobno in ugotoviti, kaj se s kapljico dogaja med padcem, saj je to vsakdanji pojav, kateremu ne namenimo dovolj zanimanja, posledično pa ne vemo, kaj se dejansko med pojavom dogaja.

Zastavili smo si tudi naslednje cilje:

- spoznati nove metode,
- ugotoviti zvezo med frekvenco nihanja in ostalimi spremenljivkami,
- s preprostimi pripravami opazovati in raziskati vsakdanji pojav.

Da bi dosegli zastavljenе cilje, smo v šolskem fizikalnem laboratoriju izvedli poskus, pri katerem smo kapljici spreminali premer in površinsko napetost s kuhinjskim detergentom. Nato smo opazovali frekvenco nihanja kapljice pri spremenjenih pogojih. Preverili smo tudi, kaj se zgodi s frekvenco kapljice, če spreminjam višino s katere pade. Pri pridobivanju podatkov iz poskusa smo si pomagali z metodo obroča Du Noüy in metodo video analize. Pridobljene podatke smo nato tudi računsko preverili, uredili in predstavili v raziskovalni nalogi.

Zaradi nevednosti o pojavi, smo si zastavili naslednja raziskovalna vprašanja:

- Kako je frekvenca nihanja kapljice odvisna od dejavnikov med padcem kapljice, ki jih lahko spreminjam?
- Ali lahko s preprostimi, vsakdanjimi pripravami opazujemo fizikalni pojav in ugotovimo zvezo med količinami?

2 METODOLOGIJA DELA

2.1 Metoda Du Noüy obroča

Metoda Du Noüy obroča je metoda, s katero izmerimo največjo možno silo, ki je potrebna za odcepitev obroča od površine vode. S to metodo se najpogosteje meri površinska napetost določene tekočine in medfazna napetost med dvema tekočinama. Pri metodi obroča Du Noüy se uporablja obroč iz tanke žice (po navadi iz platine), ki ga pomočimo v tekočino tako, da je popolnoma pod gladino. Nato z nadzorovano napravo enakomerno vlečemo obroč iz vode in opazujemo, kako se spreminja sila (KRÜSS Scientific, brez datuma).

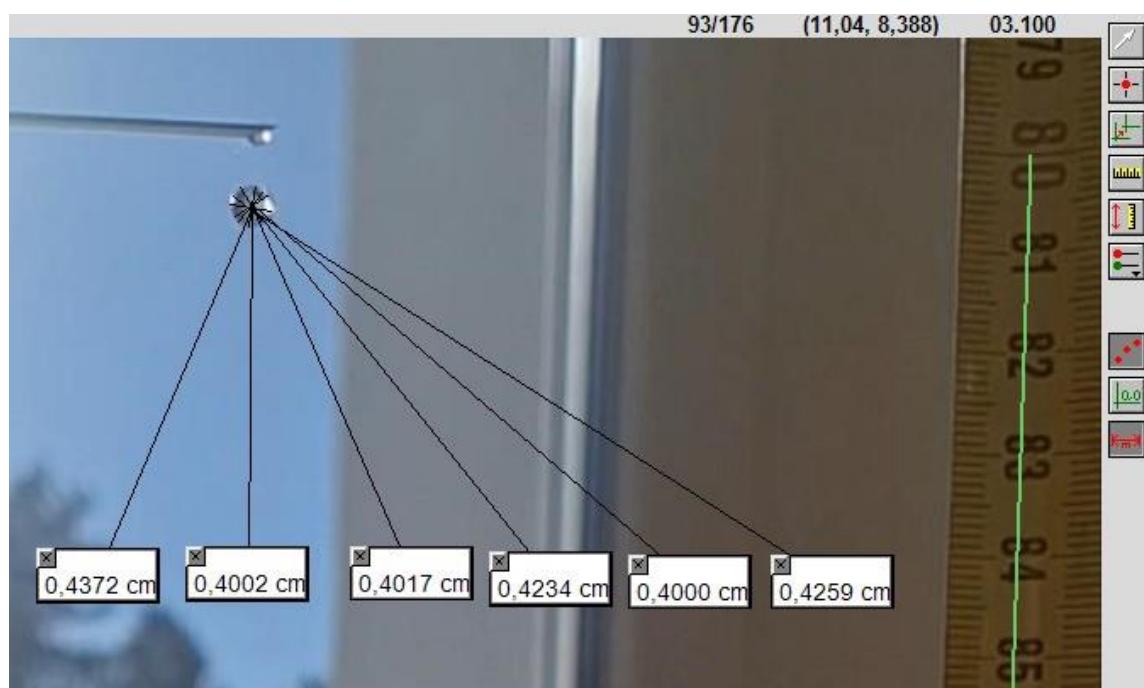
Pri našem poskusu smo se zgledovali po metodi obroča Du Noüy. Ker nismo imeli žice iz platine, smo uporabili bakreno žico, ki smo jo oblikovali v obliko zvezde (zaradi večjega obsega, ki pomeni večjo silo površinske napetosti). Nanjo smo privezali vrvice tako, da je bila oblika uravnovešena. Obliko smo obesili na silomer, nato pa ga namočili v posodo s tekočino. Posoda je bila postavljena na mizico, kateri smo lahko spremenjali višino. Višino mizice smo spremenjali do mere, dokler se oblika ni ločila od gladine tekočine. Izmerili smo silo, ki je potrebna za ločitev oblike od tekočine, saj smo s pomočjo te lahko izračunali njeno površinsko napetost.



Slika 1:Metoda obroča Du Noüy (lasten vir)

2.2 Metoda video analize

Ker je nihanje kapljice težko zaznati s prostim očesom in je nemogoče karkoli izmeriti, smo si pomagali z video analizo. Padec kapljice smo posneli z napravo Samsung A54. Posnetke smo nato analizirali s pomočjo aplikacije Logger Pro 3.14.1.



Slika 2: Merjenje premera s pomočjo video analize (lasten vir)

2.3 Spreminjanje polmera

Ko smo ugotovili, da je frekvenca zagotovo odvisna od polmera padajoče kapljice, smo naredili eksperiment, pri katerem smo z iste višine spuščali kapljice z različnimi polmeri s pomočjo medicinskih igel različnega premera. Uspelo nam je producirati kapljice s premerom med 3 – 5 mm. Kapljice smo posneli s pomočjo mobilne naprave Samsung Galaxy A54, kasneje pa posnetke naložili v aplikacijo Logger Pro 3.14.1. V aplikaciji smo nato zmerili premere kapljic. Iz izračunanih premerov smo nato določili še polmere, za katere smo izračunali še absolutne in relativne napake (glej prilogo 1).

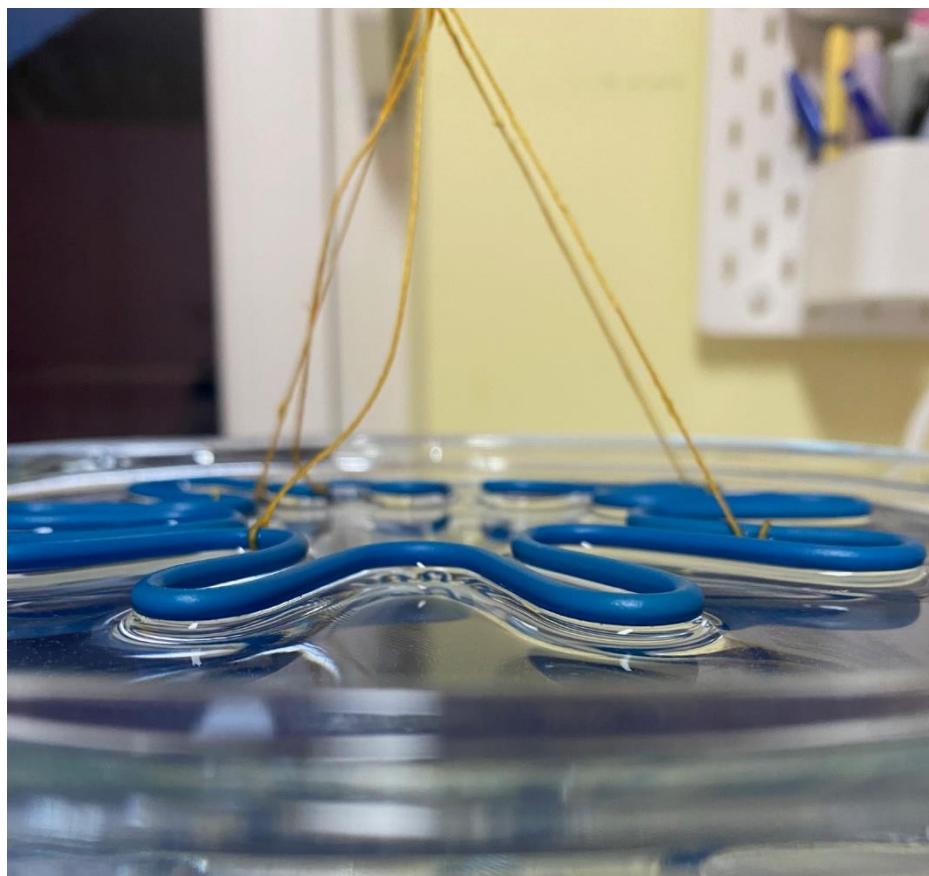


Slika 3:Igle različnih premerov (lasten vir)

2.4 Spreminjanje površinske napetosti

S pomočjo kuhinjskega detergenta smo spreminjali površinsko napetost tekočine, v katero smo pomočili obroč. Z dodajanjem različnih količin detergента, smo ustvarili različne raztopine milnice. Z narejeno obliko smo po metodi obroča Du Noüy izmerili največjo silo, ki je potrebna za ločitev oblike od tekočine. S pomočjo te smo nato po enačbi $\gamma = \frac{F}{l}$ izračunali površinsko napetost za vsak vzorec tekočine, s katerim smo kasneje producirali kapljice.

Nato smo s pomočjo kapalke spuščali kapljice, iz enake višine in vse skupaj posneli z napravo Samsung a80. Nato smo s pomočjo aplikacije Logger Pro 3.14.1. analizirali nihanje kapljice in z računskim postopkom izračunali spremembo frekvence.



Slika 4: Učinki površinske napetosti (lasten vir)

2.5 Spreminjanje višine

Ko smo se dokopali do enačbe za izračun frekvence padajoče kapljice, smo hitro opazili, da višina sploh ne nastopa v enačbi. Iz tega smo sklepali, da frekvenca sploh ni odvisna od višine, s katere spustimo kapljico. Da bi naš sklep preverili, smo izvedli poskus, pri katerem smo spuščali kapljico z istim premerom z različnih višin. Kapljico smo spustili s 15 cm, 25 cm in 35 cm višine in vse skupaj posneli. Nato smo posnetke analizirali v aplikaciji Logger Pro 3.14.1. in ugotovili, da se frekvenca res ne spreminja z višino.



Slika 5: Padec kapljice z višine 35 cm (lasten vir)

3 TEORETIČNI DEL

3.1 Nihanje kapljice

Nihanje je periodično gibanje iz ene skrajne lege v drugo skrajno lego in nazaj v izhodiščno točko (A., 2023). Je ena najpogostejših pojavov v naravi - opazimo ga tudi pri padcu kapljice. S prostim očesom nihanje težko zaznamo, če pa padec kapljice posnamemo in pogledamo v počasnem posnetku, lahko brez težav opazimo, da kapljica res niha. Pri tem kapljica spreminja obliko, in sicer iz sploščenega sferoida v podolgovati sferoid in obratno (Roa, Renoult, Dumouchel, & Brändle de Motta, 2023). Opisana oblika kapljice seveda ni popoln sferoid, saj na kapljico močno vpliva viskoznost - merilo odpora tekočine proti strižni napetosti, ki delujejo na plasti tekočine med gibanjem (Roa, Renoult, Dumouchel, & Brändle de Motta, 2023). Viskoznost je tudi glavni dejavnik, zaradi katerega kapljica preživi več časa v podolgovati obliki kot sploščeni (Roa, Renoult, Dumouchel, & Brändle de Motta, 2023).

Kapljica z nihanjem prične takoj, ko zapusti svoje sferično ravnovesno stanje. Takrat se ji poveča površina, kar vpliva na površinsko napetost (Roa, Renoult, Dumouchel, & Brändle de Motta, 2023). Površinska napetost je glavni dejavnik, zaradi katerega kapljica začne nihat. Večji polmer kot ga kapljica ima, z manjšo frekvenco niha.

Da bi analizirali nihanje kapljice, lahko le – tega primerjamo z nihanjem vzemtnega nihala. Frekvenco vzemtnega nihala izračunamo kot:

$$\nu \propto \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Pri vzemtnem nihalu je glavni dejavnik za nihanje prožnostni koeficient (k), pri nihanju kapljice pa površinska napetost (γ), zato lahko v prej zapisani enačbi prožnostni koeficient zamenjamo s površinsko napetostjo in sklepamo, da:

$$\nu \propto \sqrt{\frac{\gamma}{m}}$$

Maso v zgornji enačbi lahko predpostavimo kot maso kapljice, ki jo lahko izrazimo kot produkt gostote in kuba polmera kapljice (ρr^3). Če to vstavimo v zgornjo predpostavko dobimo:

$$v \propto \sqrt{\frac{\gamma}{\rho r^3}}$$

Če zgornjim ugotovitvam dodamo še konstanto $\sqrt{\frac{2}{\pi^2}}$, dobimo enačbo Lord Rayleighove teorije o nihanju kapljice (MinuteLaboratory, 2013):

$$v = \sqrt{\frac{2}{\pi^2}} \times \sqrt{\frac{\gamma}{\rho r^3}}$$

3.2 Prosti pad

Ko opazujemo padec kapljice, v bistvu opazujemo prosti pad. Glavni povzročitelj tega pojava je gravitacijski pospešek, ki povzroči, da se kapljica enakomerno pospešeno giba proti tlom. Težnostni pospešek pa ni konstanten, ampak se glede na to, kje na Zemlji se nahajamo, spreminja. Gravitacijski pospešek v Mariboru smo izmerili s pomočjo telefona in aplikacije Phyphox, in sicer $9,80 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. Za prosti pad kapljice velja, da ima ta na začetku začetno hitrost $0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, nato pa enakomerno pospešuje. Pri prostem padu na kapljico vpliva še en dejavnik - zračni upor. Ker smo kapljico spuščali z zelo majhnih višin (15 – 35 cm), je zračni upor zanemarljiv in na gibanje bistveno ne vpliva.

Če celotni pojav pogledamo s pomočjo znanja o energijah, ugotovimo naslednje: kapljica ima na začetku največjo potencialno energijo. Ko kapljica začne padati, se začne potencialna energija manjšati in pretvarjati v kinetično energijo, ki se posledično veča. Največjo kinetično energijo ima kapljica tik preden zadane ob tla.

Kapljica pade z neke višine h in nato prosto pada. Na začetku naloge smo predpostavili, da bo frekvenca nihanja kapljice odvisna tudi od višine, s katere pade. To smo predpostavili predvsem zaradi zračnega upora, ki vpliva na kapljico med padanjem. Ko smo podrobnejše raziskali nihanje in se dokopali do enačbe za izračun frekvence, smo ugotovili, da višina v enačbi za frekvenco ne nastopa in da frekvenca od višine sploh ni odvisna.

3.3 Tekočine

Tekočine so snovi, ki tečejo in se med seboj mešajo. Skoznje se lahko premikamo in lahko jih prelivamo. Niso raztegljive, lahko pa jih stisnemo. Tekočine zlahka spreminjajo obliko, torej se ne upirajo zunanjim silam. Zaradi tega nimajo lastne oblike, oziroma zavzamejo obliko posode v kateri so.

Tekočine delimo na pline in kapljevine. Plini so zelo lahki glede na svoj volumen. Imajo majhno gostoto v redu velikosti: $1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, so stisljivi in gibljivi ter zlahka se mešajo. Zavzamejo celoten prostor, zato je njihova prostornina enaka prostornini prostora. Gostota plina je po vsej prostornini enaka. Kapljevine se od plinov ločujejo po večji gostoti v redu velikosti: $1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. So bolj viskozne in manj stisljive. Podobno kot plini, se tudi kapljevine prilagodijo posodi. Pri tem ne zavzamejo celotne prostornine posode in ohranijo le svojo prvotno prostornino. Prilagodijo se obliki posode, pri tem pa napolnijo le spodnji del posode, tako da tvorijo prosto površino.

Lastnosti kapljevin so posledica dejstva, da so sestavljeni iz skupin molekul. Gibljivost molekul omogoča, da tekočine tečejo. Z medsebojnimi trki spreminja smer in hitrost gibanja (Kladnik, 1985).

3.4 Površinska napetost

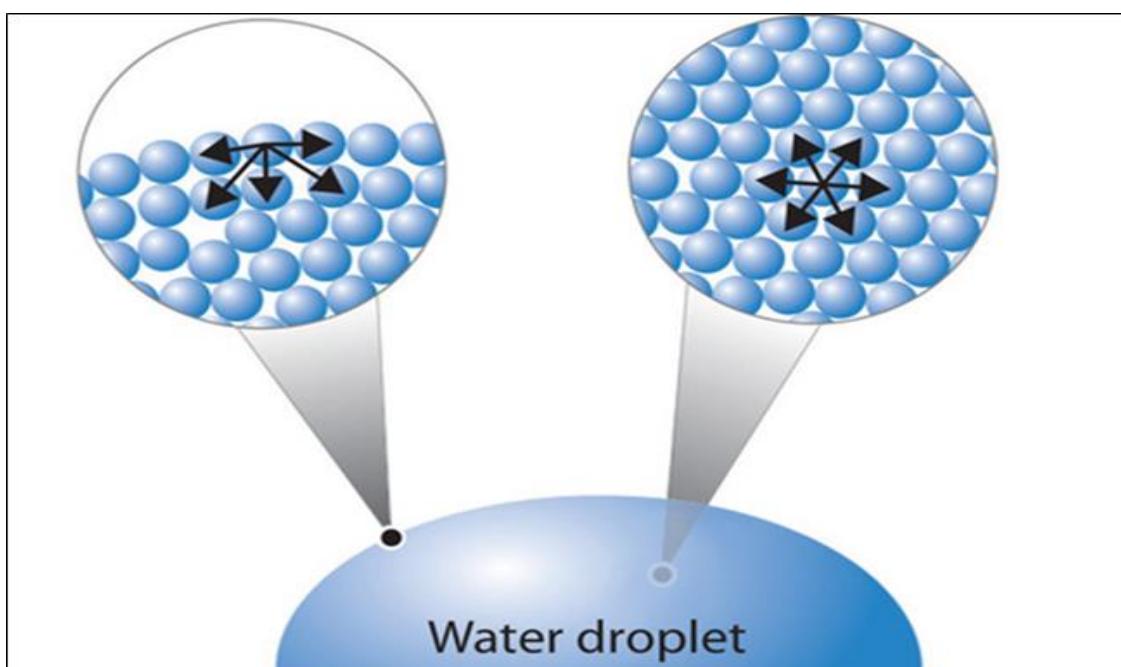
Površinska napetost je fizikalna količina, ki je prisotna pri mnogih naravnih in vsakodnevnih pojavih: nekatere žuželke lahko, zaradi te hodijo po površini vode, sponka za papir lahko plava na gladini, kljub temu da je njena specifična teža večja od vode, ne nazadnje pa omogoča tudi tvorbo vodne kapljice. Površinska napetost se pojavi tudi v trdnih snoveh, kjer pa ne povzroči veliko vidnih efektov.

Površinska napetost je posledica privlačnih sil med polarnimi molekulami v kapljevini. Posamezne molekule vode se rade združujejo v skupine, saj je to zanje energijsko bolj ugodno. Molekule na površini imajo manj sosednjih molekul kot tiste v notranjosti, zato so molekule na površini v energijsko manj ugodnem položaju. Čim manjša je površina vode pri dani prostornini, tem večja je tudi energijska ugodnost. Najmanjšo površino ima dana količina vode

tedaj, ko je omejena v sfero. Razmerje med površino in prostornino sfere je določeno s količino vode, pri čemer je R polmer krogle. Pri kocki je na primer to razmerje večje (pri enaki prostornini,

$a^3 = 4 \pi^3 R^3$). Kapljice so zato bolj ali manj okrogle, kot so zaradi istega vzroka okrogli tudi mehurčki in CO_2 v mineralni vodi. Hkrati pa vidimo, da je razmerje med površino in prostornino odvisno tudi od količine vode: čim več je vode, tem večji je polmer in tem manjše je razmerje med površino in prostornino. To je tudi glavni razlog, zakaj se manjše kapljice pogosto zlivajo v večje (Rovšek & Kušar, 2005).

Definicija površinske napetosti nam pove, da je površinska napetost v glavnem odvisna od privlačnih sil med delci v dani tekočini in tudi od plina, trdne snovi ali tekočine v stiku z njo. Površinska napetost je posledica privlačnih molekulskih sil med molekulami kapljevine. V notranjosti kapljevine je vsaka molekula z vseh strani obdana z drugimi molekulami, zato jo sile vlečejo enako v vse smeri in je rezultanta sil enaka nič. Za plast molekul na gladini pa to ne velja. Molekule iz notranjosti kapljevine delujejo nanje s privlačnimi silami, ki jih pa molekule plina z druge strani ne uravnovesijo, tako da jih uravnovesi le nestisljivost kapljevine (Rovšek & Kušar, 2005).



Slika 6: Sile med molekulami vode (LibreTexts Chemistry, 2020)

Površinska napetost je definirana kot količnik med silo površinske napetosti (usmerjena tangencialno na površino, deluje v smeri zmanjšanja površine) in dolžino mejnega roba tekočine. Če je opna tekočina na obeh straneh obdana z zrakom, moremo kot dolžino vzeti dvakratni obseg $2l$: (OpenProf, 2024)

$$\gamma = \frac{F}{2l}$$

Od običajnih kapljevin ima voda največjo površinsko napetost, večjo ima le živo srebro, kot je prikazano v spodnji tabeli. S spodnjimi vrednostmi smo primerjali tudi naše izmerjene vrednosti površinske napetosti (Satcitananda podjetje za proizvodnjo, trgovino in izobraževanje d.o.o., Ljubljana, 2024).

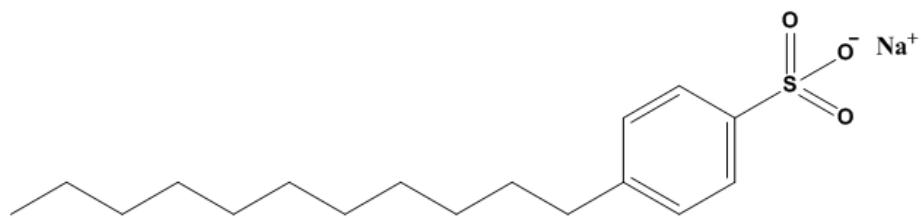
Kapljevina	Površinska napetost $\left[\frac{N}{m}\right]$
Voda	0,073
Milnica	0,025
Aceton	0,026
Benzen	0,029
Olivno olje	0,033
Glicerin	0,064
Živo srebro	0,470

Tabela 1: Površinske napetosti različnih tekočin (OpenProf, 2024)

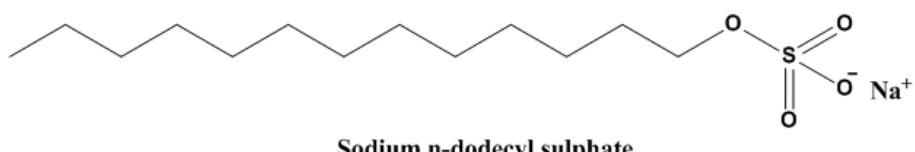
3.5 Struktura in sestava detergenta

Na trgu je veliko čistilnih izdelkov in večina jih imenujemo detergenti. Detergent je snov ali zmes, ki vsebuje mila in/ali površinsko aktivne snovi (katera koli organska snov/mešanica), namenjena za postopke pranja in čiščenja (Authority, 2023).

Detergenti zajemajo razred kemikalij, za katere je značilna amfifilna molekularna struktura, kjer ima vsaka posamezna molekula hidrofilno (polarno) glavo in podolgovat hidrofoben (nepolaren) rep (A., 2023).



Sodium n-dodecyl benzene sulphonate



Sodium n-dodecyl sulphate

Slika 7: Kemijska sestava detergenta (Learning, 2020)

Detergenti so razvrščeni v štiri široke skupine, odvisno od električnega naboja površinsko aktivnih snovi. Detergent, ki smo ga uporabili pri eksperimentu, spada med anionske detergente.

4 REZULTATI

4.1 Računanje frekvence pri različnih polmerih

Ko smo s pomočjo video analize izmerili polmere, smo lahko izračunali frekvenco vodne kapljice pri različnih polmerih. Frekvenco smo računali po enačbi $\nu = \sqrt{\frac{2}{\pi^2}} \times \sqrt{\frac{\gamma}{\rho r^3}}$, kot primer smo navedli spodnji račun, da je vidno, kako smo računali frekvenco:

$$\nu = \sqrt{\frac{2}{\pi^2}} \times \sqrt{\frac{\gamma}{\rho r^3}} = \sqrt{\frac{2 \times 0,074 \frac{\text{N}}{\text{m}}}{\pi^2 \times 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times (2,54 \text{ mm})^3 \times 10^{-9}}} = 30 \text{ Hz}$$

Za gostoto smo uporabili gostoto vode v teoriji $\rho = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. Površinsko napetost vode smo izračunali (za postopek glej poglavje 4.7 Računanje frekvenc in različnih površinskih napetostih) kot:

$$\gamma = \frac{F}{2l} = \frac{0,14 \text{ N}}{2 \times 0,95 \text{ m}} = 0,074 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Dobili smo naslednje izračune:

$\bar{r} [\text{mm}]$	$\nu_{izračunana} [\text{Hz}]$
2,54	30
2,46	32
2,08	41
1,9	47
1,85	49

Tabela 2: Vrednosti frekvence pri določenem polmeru

4.2 Merjenje frekvence pri različnih polmerih

Frekvence smo izmerili s pomočjo video analize. Ker so bili posnetki v počasnem načinu, smo morali izračunali koeficient za katerega je video upočasnjen. Koeficient smo izračunali kot količnik pravega časa padanja kapljice (t) in časa padanja kapljice, ki je bil prikazan med predvajanjem počasnega posnetka (t'):

$$k = \frac{t}{t'}$$

Pravi čas padanja kapljice smo izračunali s pomočjo enačbe časa pri prostem padu:

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

k	Δk
0,066	-0,007
0,069	-0,004
0,084	0,010
0,073	0,000
0,073	0,000

Tabela 3: Izračunani koeficienti in njihovo odstopanje od povprečne vrednosti

$$\bar{k} = 0,073$$

$$k = 0,073 \pm 0,004$$

$$k = 0,073 (1 \pm 5,5\%)$$

Frekvenca posnetkov telefona je bila 30fps.

S pomočjo video analize smo izmerili nihajni čas kapljice v počasnem posnetku. Nihajni čas počasnega posnetka smo nato pomnožili s koeficientom in dobili nihajni čas kapljice. Nato smo po naslednji enačbi dobili frekvence nihanja kapljic:

$$\nu = \frac{1}{t_0}$$

Dobili smo naslednje izmerjene rezultate:

\bar{r} [mm]	$\nu_{izmerjena}$ [Hz]
2,54	27
2,46	29
2,08	38
1,89	40
1,85	46

Tabela 4: Polmeri in izmerjene frekvence pri danem polmeru

4.3 Primerjava izmerjenih in izračunanih vrednosti

$\nu_{izmerjena}$ [Hz]	$\nu_{izračunana}$ [Hz]
27	30
29	32
38	41
40	47
46	49

Tabela 5: Primerjava izmerjenih in izračunanih frekvenc

Če izmerjene rezultate primerjamo z izračunanimi, opazimo, da se rezultati dokaj dobro ujemajo, zato lahko uporabljene metode označimo kot uspešne. Kljub podobnosti rezultatov je prišlo do manjših odstopanj, kar lahko pripisemo nenatančnim ocenam pri video analizi.

Ker je prišlo do majhnih odstopanj, smo izračunali napake za izmerjene frekvence in izračunane frekvence. Z napakami smo nato preverili, če izmerjene in izračunane vrednosti ležijo na istem intervalu.

Napake smo računali z naslednjimi podatki (podatki o nihajnih časih so zapisani v prilogi 3):

$$r = 2,54 \text{ (} 1 \pm 1,17\% \text{)} \text{ mm}$$

$$\rho = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\gamma = 0,074 \frac{\text{N}}{\text{m}} \pm 0,001 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$k = 0,073 \text{ (} 1 \pm 5,5\% \text{)}$$

$$\nu_{izračunana} = \sqrt{\frac{2}{\pi^2}} \times \sqrt{\frac{\gamma}{\rho r^3}} = \sqrt{\frac{2 \times 0,074 (1 \pm 1,4\%) \frac{\text{N}}{\text{m}}}{\pi^2 \times 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times (2,54 \text{ mm}(1 \pm 1,2\%))^3 \times 10^{-9}}} = 30 \text{ (} 1 \pm 2,4\% \text{)} \text{ Hz}$$

$$\nu_{izmerjena} = \frac{1}{t_0} = \frac{1}{k \times t'_0} = \frac{1}{0,073 (1 \pm 5,5\%) \times 0,51 (1 \pm 2\%)} = 27 \text{ (} 1 \pm 7,5\% \text{)} \text{ Hz}$$

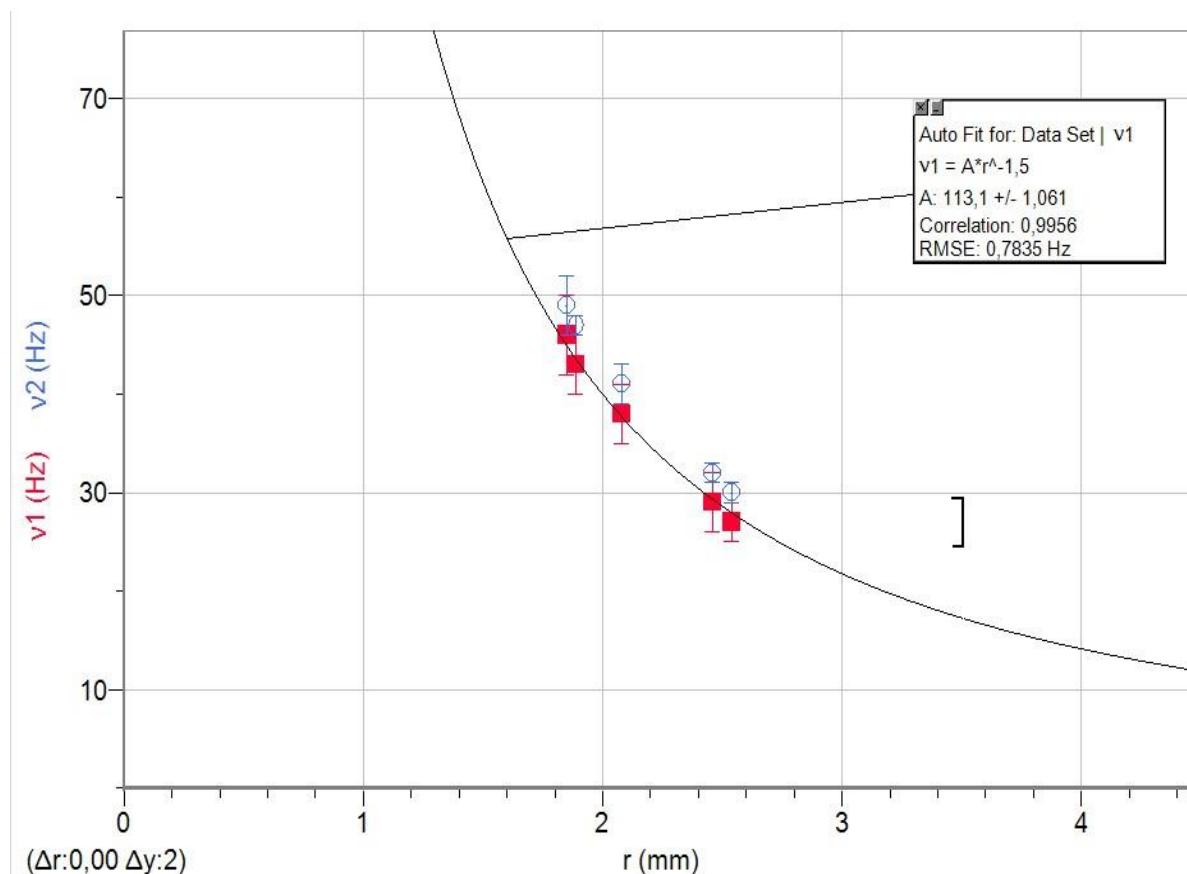
	$\nu_{izmerjena} [\text{Hz}]$	$\nu_{izračunana} [\text{Hz}]$
RADIJ 1	27 ± 2	30 ± 1
RADIJ 2	29 ± 3	32 ± 1
RADIJ 3	38 ± 3	41 ± 2
RADIJ 4	43 ± 3	47 ± 1
RADIJ 5	46 ± 4	49 ± 3

Tabela 6: Primerjava izmerjenih in izračunanih frekvenc skupaj z napakami

Kot lahko razberemo iz tabele, vsi rezultati ležijo na enakem intervalu, kar pomeni, da so rezultati ustrezni. Intervale smo določili na podlagi napak izračunanih in izmerjenih frekvenc (glej prilogi 3).

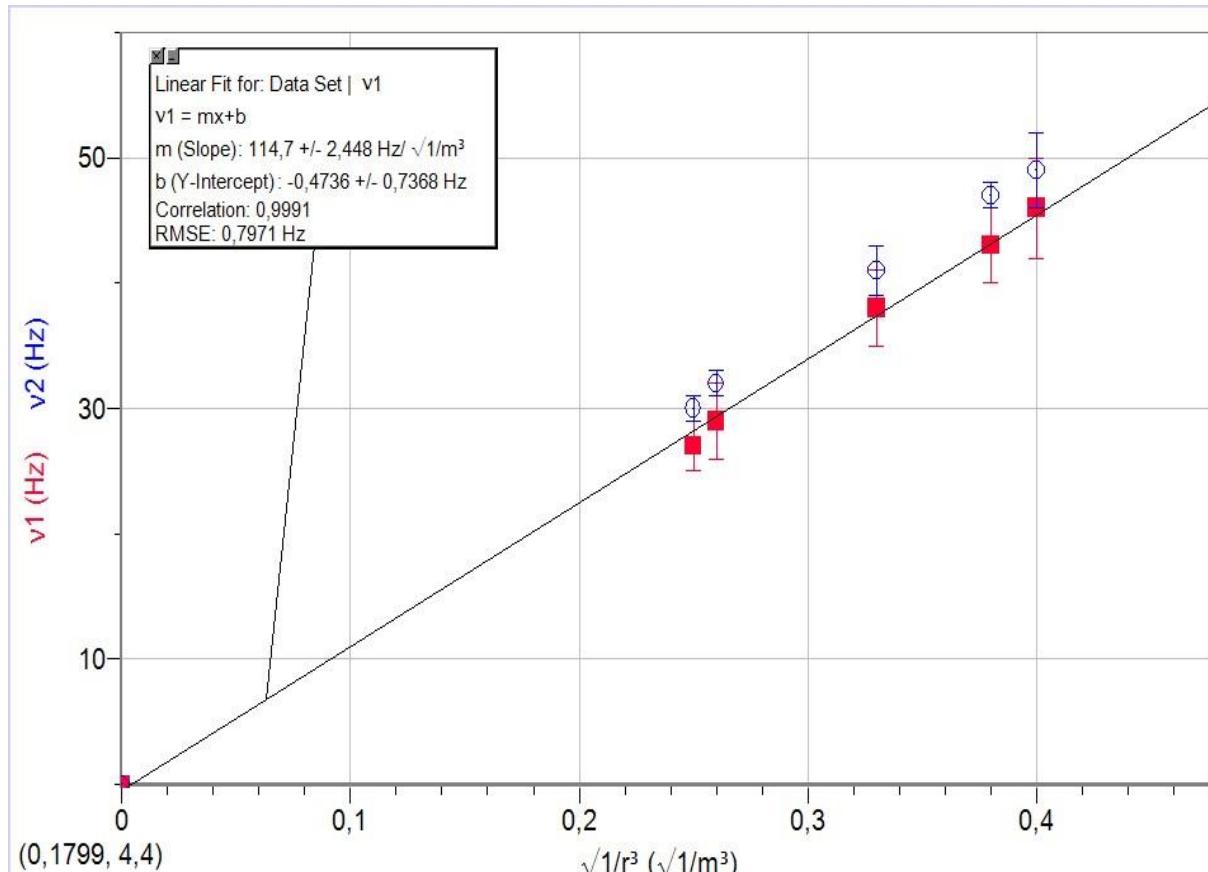
4.4 Iskanje zveze med polmerom in frekvenco

Da bi ugotovili zvezo med polmerom in frekvenco, smo si pomagali z aplikacijo Logger Pro. Izmerjene in izračunane frekvence v odvisnosti od polmera izračunane vrednosti smo vnesli v aplikacijo, ta pa je izrisala sledeči graf:



Graf 1: Graf merjene frekvence (rdeča) in izračunane frekvence (modra) v odvisnosti od polmera (lasten vir)

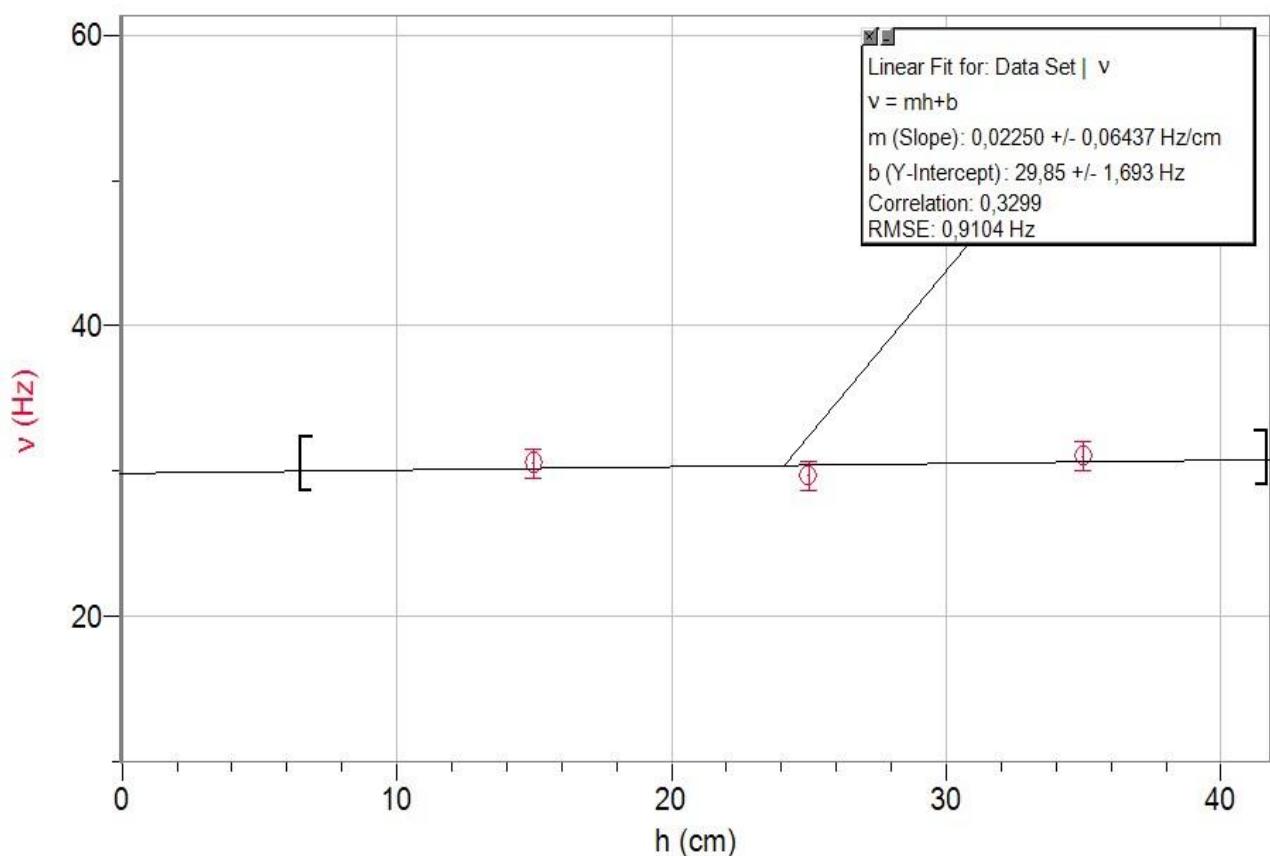
Da bi ugotovili zvezo med frekvenco in polmerom, smo graf linearizirali in ugotovili zvezo med količinama: $v \propto \sqrt{\frac{1}{r^3}}$



Graf 2: Lineariziran graf izmerjene frekvence (rdeča) in izračunane frekvence (modra) v odvisnosti od polmera (lasten vir)

4.5 Dokaz, da višina ne vpliva na frekvenco

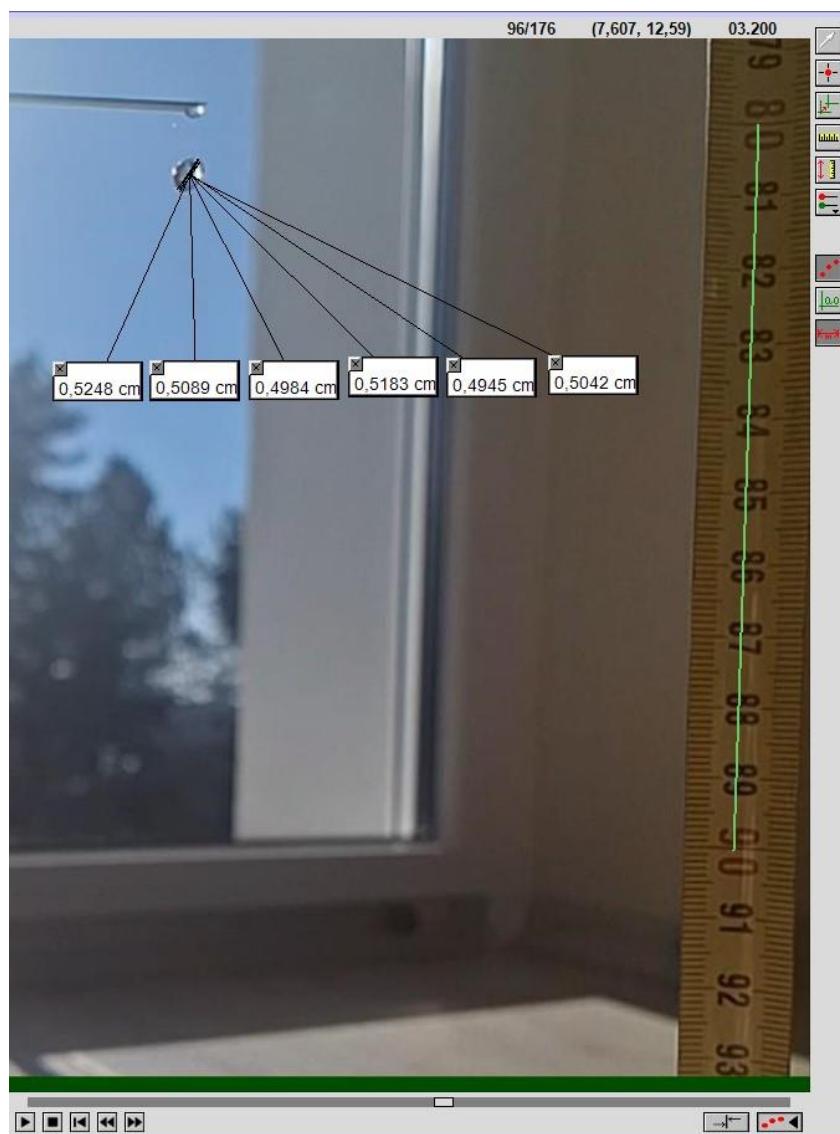
Pred začetkom naše raziskave smo postavili hipotezo, da je frekvenca odvisna od višine. Ko smo odkrili enačbo za izračun frekvence, smo ugotovili, da višina v enačbi sploh ne nastopa, in da posledično ta na frekvenco ne vpliva. Da bi našo ugotovitev res dokazali, smo kapljice istega premera (2,54 mm) spustili z višine 15 cm, 25 cm in 35 cm. Pri vseh meritvah je frekvenca ostala enaka, in sicer okoli 30 Hz (na grafu so opazna tudi manjša odstopanja, zaradi nenantančnosti).



Graf 3: Graf frekvence v odvisnosti od višine (lasten vir)

4.6 Faktor raztega kapljice

Kapljica med padcem spreminja obliko, in sicer iz podolgovatega v sploščeni sferoid. Med analizo polmera smo opazili, da se kapljica vedno raztegne za približno enak faktor (glej prilogo 2). Enak faktor je posledica ohranitve volumna. Sile površinske napetosti silijo kapljico v obliko sfere. Ko kapljica med padcem niha, mora zaradi teh sil ohraniti isti volumen pri čim manjši površini. Zato se kapljica raztegne za enak faktor, ko je v obliki sploščenega sferoida in ko je v obliki podolgovatega sferoida.

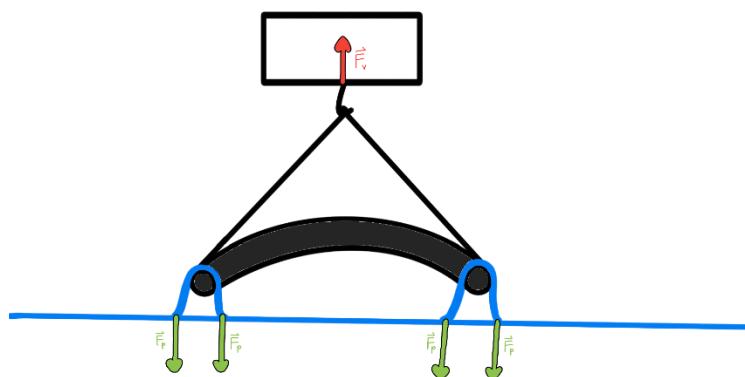


Slika 8: Merjenje raztega kapljice v aplikaciji Logger Pro (lasten vir)

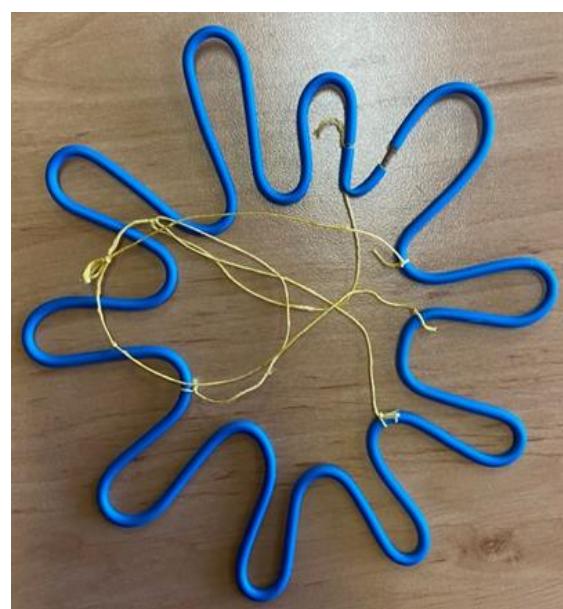
4.7 Računanje frekvence pri različnih površinskih napetostih

Z metodo Du Noüy obroča smo izmerili površinske napetosti za različne pripravljene vzorce tekočin. Na mizico, kateri lahko z vrtenjem vijaka spremojamo višino, smo postavili prozorno posodo, ki je bila do vrha polna z vodo (600 ml). Nato smo s pomočjo obroča v obliki zvezde, katerega obseg je meril $95 \text{ cm} \pm 2 \text{ cm}$ in silomerom, izmerili silo.

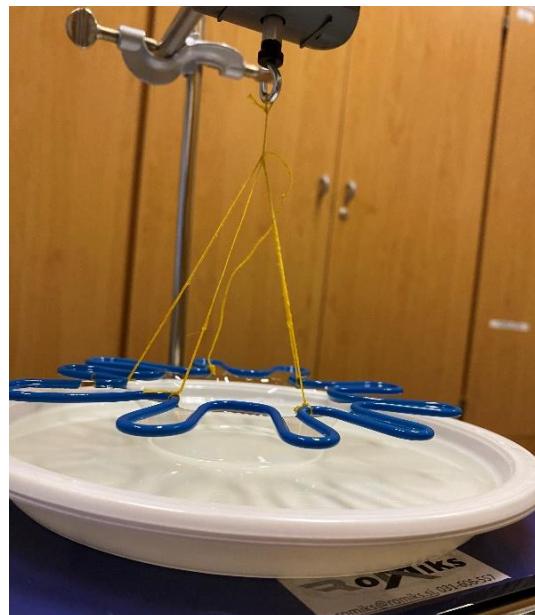
Pri tem smo upoštevali le pravokotno silo (kot prikazuje slika).



Slika 9: Prikaz sil površinske napetosti na obroč pri Du Noüy obroča metodi (lasten vir)



Slika 10: Obroč v obliki zvezde (lasten vir)

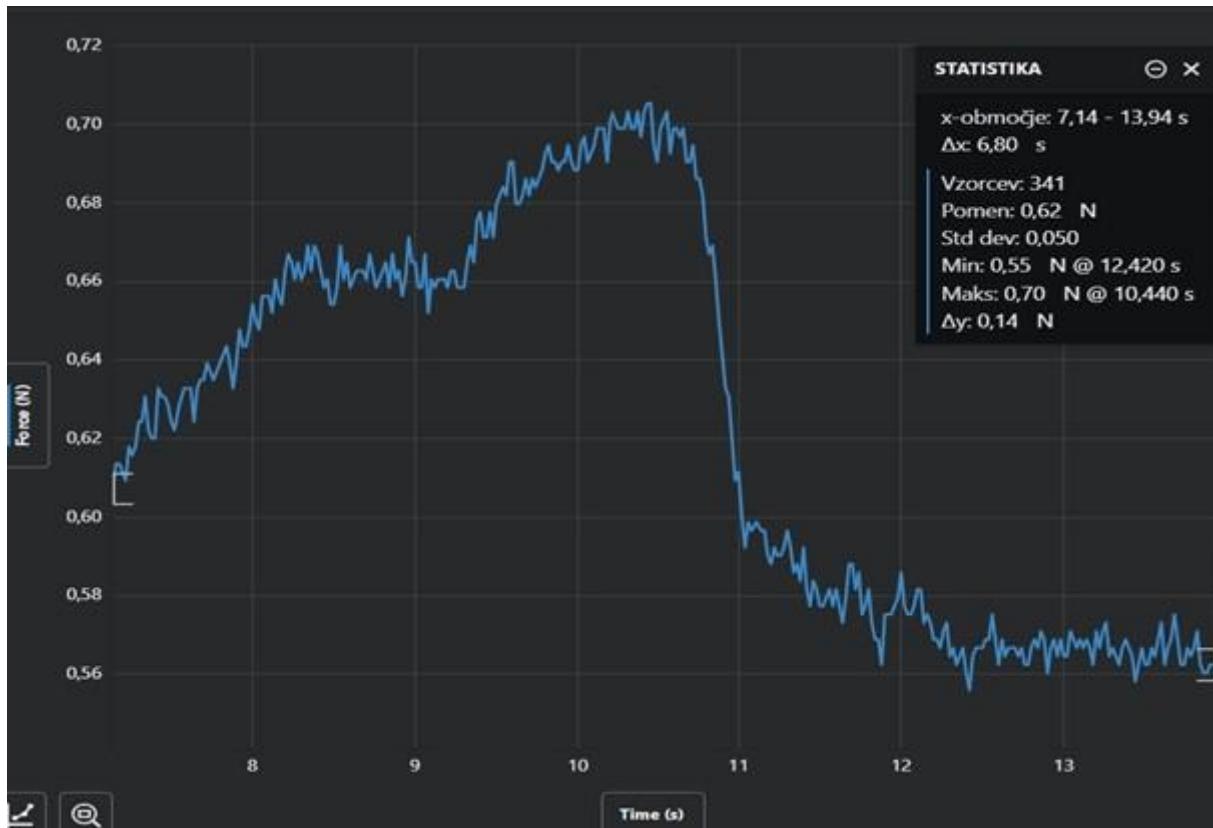


Slika 11: Prikaz postopka metode (lasten vir)

Izmerjena sila je enaka sili, ki jo obroč potrebuje, da premaga silo površinske napetosti. Silomer je za vsako meritev izrisal graf sile, ki smo ga analizirali v programu Vernier Graphical Analysis. Zanimala nas je razlika med najvišjo in najnižjo izmerjeno silo, (da dobimo silo površinske napetosti, moramo odšteti silo teže, ki deluje na obroč).



Slika 12: Silomer (lasten vir)



Slika 13: Prikaz grafa sile površinske napetosti iz Vernier Graphical Analysis (lasten vir)

Iz grafa smo izračunali silo kot: $\Delta F = F_y - F_g = 0,70 \text{ N} - 0,56 \text{ N} = 0,14 \text{ N} \pm 0,01 \text{ N}$.

Nato smo izračunano silo in obseg obroča vstavili v enačbo za izračun površinske napetosti:

$$\gamma = \frac{F}{2l} = \frac{0,14 \text{ N}}{2 \times 0,95 \text{ m}} = 0,074 \frac{\text{N}}{\text{m}} \pm 0,007 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Pri izračunu površinske napetosti smo upoštevali tudi napako meritev pri sili površinske napetosti in obsegu obroča. Obseg obroča je $0,95 \text{ m} \pm 0,02 \text{ m}$.

$$\delta\gamma = 0,02 + 0,07 = 0,09$$

$$\Delta\gamma = 0,007 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Za polmer smo vzeli vrednost izmerjeno v Logger Pro-ju: $r = 2,5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$. Za gostoto smo vzeli gostoto vode v teoriji $\rho = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. Nazadnje smo vse podatke vstavili v enačbo za frekvenco:

$$\nu = \sqrt{\frac{2}{\pi^2}} \times \sqrt{\frac{\gamma}{\rho r^3}} = \sqrt{\frac{2 \times 0,074 \frac{\text{N}}{\text{m}}}{\pi^2 \times 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times (2,5 \text{ mm})^3 \times 10^{-9}}} = 31 \text{ Hz} \pm 3 \text{ Hz}$$

Pri tem smo upoštevali tudi napake in izračunali napake izračunanih frekvenc.

Pri napaki frekvence smo upoštevali prej izračunano napako površinske napetosti in napako radija.

$$\delta\nu = \frac{1}{2}(0,12 + 0,09) = 0,01$$

$$\Delta\nu = 3 \text{ Hz}$$

Rezultate smo predstavili v spodnji tabeli:

	$\gamma \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right]$	$\nu_{izmerjena} [\text{Hz}]$
VODA	0,074	31 ± 3
MILNICA 1	0,043	24 ± 5
MILNICA 2	0,040	23 ± 3
MILNICA 3	0,032	20 ± 3
MILNICA 4	0,026	18 ± 9

Tabela 7: Rezultati izračunanih frekvenc in njihove napake pri različnih površinskih napetostih.

Poleg izračunanih vrednosti, pa smo frekvenco izmerili s pomočjo video analize. Najprej smo izračunali koeficient, za katerega se je čas nihanja podaljšal, saj je bil posnetek posnet v počasnem posnetku. Koeficient smo dobili po nasladnem postopku. Najprej smo si izbrali dve poljubni legi in odčitali spremembo časa med njima. Koeficient smo izračunali kot količnik pravega časa padanja kapljice (t) in časa padanja kapljice iz počasnega posnetka (t'):

$$k = \frac{t}{t'}$$

Pravi čas padanja kapljice smo izračunali s pomočjo enačbe časa pri prostem padu:

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

Ta koeficiente je $0,057 \pm 0,001$. Nato pa smo si označili razdaljo med dvema nihajema in dobili nihalni čas. Tega smo nato v enačbi za frekvenco vstavili.

$$\nu = \frac{1}{t'_0 k} = \frac{1}{0,67s \times 0,057} = 26\text{Hz} \pm 2 \text{ Hz}$$

Tudi pri tem izračunu smo upoštevali napake meritev. Upoštevali smo napako nihalnega časa. Tega smo izmerili tako, da smo določili dve zaporedni enaki oblikni kapljici in tako odčitali spremembo časa in dobili nihajni čas t'_0 .

	$t'_0[\text{s}]$
VODA	$0,58 \pm 0,02$
MILNICA 1	$0,60 \pm 0,03$
MILNICA 2	$0,67 \pm 0,03$
MILNICA 3	$0,63 \pm 0,02$
MILNICA 4	$0,57 \pm 0,04$

Tabela 8: Izmerjeni nihajni časi pri različnih koncentracijah milnice z napakami meritev

S tem smo določili tudi napako izmerjene frekvence.

Tak postopek smo ponovili za vse ostale 4 vzorce milnice. Dobili smo naslednje rezultate:

	$\gamma \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right]$	$\nu_{izmerjena} [\text{Hz}]$	$\nu_{izmerjena} [\text{Hz}]$
VODA	0,074	30 ± 2	31 ± 3
MILNICA 1	0,043	29 ± 2	24 ± 5
MILNICA 2	0,040	26 ± 2	23 ± 3
MILNICA 3	0,032	28 ± 1	20 ± 3
MILNICA 4	0,026	31 ± 3	18 ± 9

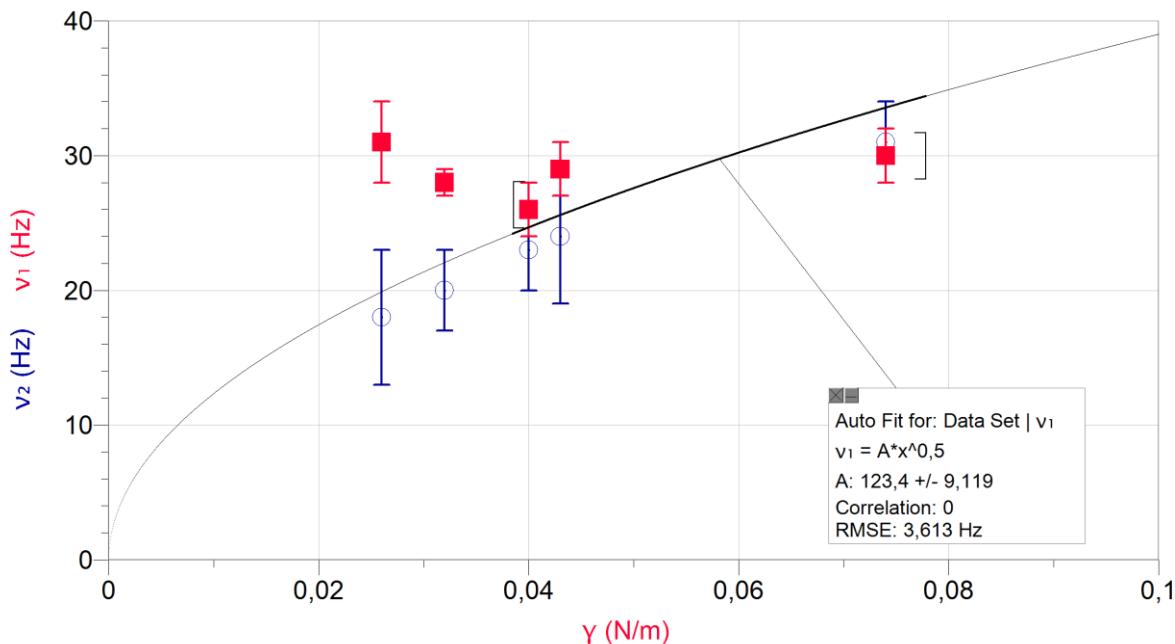
Tabela 9: Rezultati izračunanih in izmerjenih frekvenc pri različnih površinskih napetostih in njihove napake

Kot lahko vidimo iz tabele 9, se rezultati z intervali napak ujemajo. Odstopata le rezultata milnice 3 in 4.

4.8 Iskanje zveze med frekvenco in površinsko napetostjo

Da bi ugotovili zvezo med površinsko napetostjo in frekvenco, smo si pomagali z aplikacijo Logger Pro.

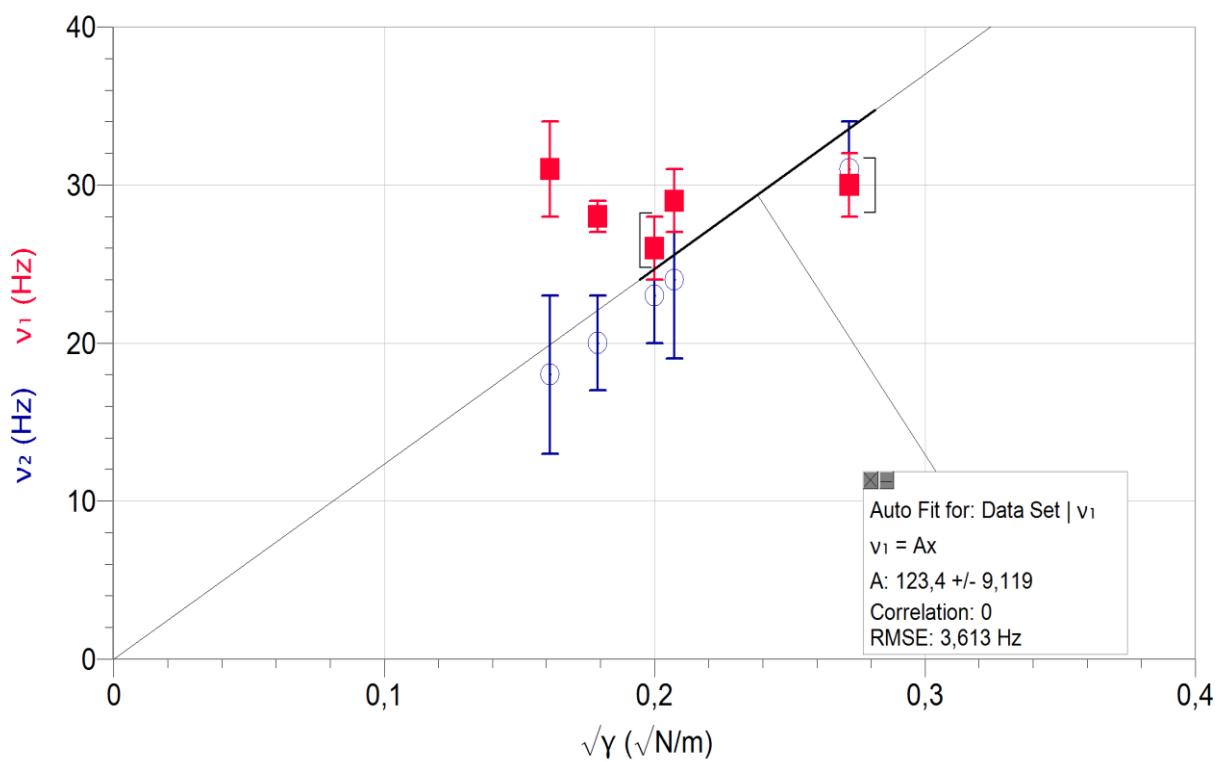
Grafe smo izrisali za izmerjene vrednosti frekvenc. Tem vrednostim smo dodali tudi napake in izbrali trendno krivuljo. Pri določanju trendne krivulje smo izpustili vrednosti vzorcev milnice 3 in 4, ker se intervali napak in vrednosti med seboj niso ujemali in so odstopali.



Graf 4: Izračunane (modre) in izmerjene (rdeče) frekvence v odvisnosti o površinske napetosti (lasten vir)

V graf smo dodali tudi izračunane frekvence(v_2) in dodali njene napake. S tem smo primerjali intervale napak. Kot prej tudi pri tem odstopata milnica 3 in 4.

Graf smo tudi linearilizirali, da bi ugotovili zvezo med spremenljivkama. Ugotovili smo, da je zveza med njima: $v \propto \sqrt{\gamma}$



Graf 5: Linearilizirani graf frekvenc v odvisnosti od površinske napetosti (lasten vir)

5 RAZPRAVA

V nalogi smo predstavili različne metode in količine, ki vplivajo na frekvenco nihanja kapljic. Izkazalo se je, da so bile vse uporabljene metode uspešne. Z njimi smo dobili smiselne rezultate, ki so skladni s teoretičnim ozadjem. Pred izvedbo naloge smo si postavili dve raziskovalni vprašanji, na kateri lahko s pomočjo pridobljenih podatkov in rezultatov odgovorimo.

5.1 Odvisnost frekvence nihanja kapljice od dejavnikov prisotnih med padcem

Pred začetkom poskusa smo se vprašali, kako je frekvanca nihanja kapljice odvisna od dejavnikov med padcem kapljice, ki jih lahko spremojamo.

Z različnimi medicinskim iglami smo dobili različne premere kapljic. S pomočjo video analize smo najprej izmerili premere kapljic, izračunali polmer, določili napake meritev in povprečne vrednosti. Pri tem ni prišlo do večjih odstopanj (priloga 1). Nato smo povprečne vrednosti vstavili v enačbo za frekvenco nihanja. Iz rezultatov je bilo razvidno, da se z manjšanjem polmerov frekvanca veča. Nakazovalo je na obratno sorazmerje. Izrisali smo grafe in jih linearizirali. S tem smo prišli do zveze med količinama: $\nu \propto \sqrt{\frac{1}{r^3}}$. To zvezo potrjuje tudi teoretično ozadje, zato lahko trdimo, da je bil poskus uspešen.

Preverili smo tudi, kako je frekvanca nihanja kapljice odvisna od višine, s katere kapljico spustimo. Že iz enačbe za računanje frekvence je bilo razvidno, da višina ne bo imela vpliva na frekvenco. Kljub temu smo izvedli poskus, pri katerem smo kapljice spuščali z različnih višin in jih posneli. S pomočjo video analize smo izrisali graf. Ta ni imel naklona in je bil linearen. Iz tega smo razbrali, da višina ne vpliva na frekvenco nihanja.

Zanimalo nas je tudi, kako je frekvanca nihanja kapljice odvisna od površinske napetosti. V enačbi za frekvenc je razvidno, da sta površinska napetost in frekvanca povezani. Izvedli smo poskus, pri katerem smo pripravili 5 vzorcev z različnimi koncentracijami detergenta oz. milnice. Za vsakega izmed vzorcev smo nato izmerili silo površinsko napetost, izračunali površinsko napetost in izračunali frekvenco. Z dobljenimi rezultati smo izrisali grafe. Pokazalo se je, da detergent zmanjšuje površinsko napetost, oziroma ošibi sile med molekulami.

Frekvenco nihanja kapljice pri različnih površinskih napetostih smo tudi izmerili. Izmerjene frekvence so odstopale od izračunanih (glej tabelo 9). Po tem, ko smo dodali napake, smo ugotovili, da se intervali napak izmerjenih in izračunanih frekvenc prekrivajo. Odstopali so le velikosti frekvence za milnico 3 in 4. Te dve nista ležali na intervalu napak izračunanih frekvenc. To kaže na nenatančnost metode. Težave se pojavijo predvsem pri določanju oblike sploščenosti kapljice in iskanju dveh zaporedjih enakih oblik. Zaradi tega je prišlo do nenatančnosti v izmerjenih frekvencah in odstopanjem.

Kljub nekaterim odstopanjem, so ostali rezultati izmerjenih frekvenc smiseln in se skladajo z izračunanimi.

Izrisali smo graf izmerjenih in izračunih frekvenc. Linearizirali smo ga in ugotovili naslednjo zvezo: $\nu \propto \sqrt{\gamma}$.

5.2 Izvedba poskusa s preprostimi, vsakdanjimi pripravami

Pred začetkom raziskave smo si zastavili vprašanje, ali lahko s preprostimi, vsakdanjimi pripravami opazujemo fizikalni pojav in ugotovimo zvezo med količinami? Dokazali smo, da lahko.

Med raziskovanjem smo uporabili telefon, obroč v obliki zvezde, silomer, igle različnih premerov, detergent, prosojno posodo za vodo, prenosni računalnik in aplikacijo Logger Pro. Vsi ti pripomočki so dokaj vsakdanji in jih lahko brez posebnega znanja uporabi vsak posameznik. Tudi mi smo s pomočjo teh pripomočkov raziskali celoten pojav padca kapljice in ugotovili, kaj se med pojavom dogaja.

5.3 Analiza raztega kapljice

Pri kasnejši analizi smo opazili, da kapljica med padanjem spreminja svojo obliko, in sicer iz podolgovatega v sploščeni sferoid. Analiza je pokazala, da se kapljica vedno raztegne za enak faktor v obeh oblikah. Ta pojav lahko povežemo z ohranitvijo volumna. Če bi se kapljica raztegnila za večji faktor, bi razpadla na manjše dele.

6 ZAKLJUČEK IN SKLEPI

V raziskovalni nalogi smo uspešno odgovorili na vsa zastavljena raziskovalna vprašanja. Ugotovili smo zvezo med frekvenco in polmerom, frekvenco in površinsko napetostjo ter frekvenco in višino. Dokazali smo tudi, da lahko fizikalni pojav preučimo s pomočjo preprostih priprav, ki so vsem na dosegu roke. Res je, da na tak način dobimo manj natančne rezultate, vendar so tudi ti dovolj dobri za pridobitev znanja o pojavu.

Dosegli smo vse zastavljene cilje. Kot že omenjeno, smo ugotovili, kako je frekvenca povezana z ostalimi količinami. Prav tako smo uporabili novo metodo – metoda obroča Du Noüy. S to metodo smo si razširili znanje na področju metod in raziskovanja. Fizikalni pojav nam je uspelo analizirati z uporabo preprostega telefona. S tem smo dokazali, da lahko z napravami, ki jih uporabljam vsak dan, dokaj podrobno raziščemo fizikalni pojav.

Vidimo tudi možnost za izboljšavo. Ker je to pojav, ki poteka zelo hitro, spremembe pa so komaj opazne, menimo, da bi analiza bila veliko bolj natančna, če bi izboljšali metodo video analize. Pri sami metodi so se pojavile težave pri določanju, kdaj je kapljica v enaki legi kot pred časom t_0 . Za bolj jasen posnetek bi bila najboljša rešitev boljša in ostrejša kamera. Kljub temu pa le- ta ne bi omogočila lažjega določanja. Z boljšo kamero bi dobili le večjo število sličic, ki so sicer ostrejše, a več sličic bi otežilo določanje.

7 VIRI IN LITERATURA

A., A. (4. Maj 2023). *Oscillation - Definition, meaning, types, examples*. Pridobljeno 14. januar 2024 iz byjus.com: <https://byjus.com/jee/oscillation/>

Authority, H. &. (2023). *What are Detergents*. Pridobljeno 5. februar 2024 iz www.hsa.ie/eng/: https://www.hsa.ie/eng/your_industry/chemicals/legislation_enforcement/detergents/what_are_detergents/

Kladnik, R. (1985). *Visokošolska fizika. Del 1 Mehanski in toplotni pojavi* (prva izd.). Ljubljana: Državna založba Slovenije. Pridobljeno 3. februar 2024

KRÜSS Scientific. (brez datuma). Pridobljeno 2. Februar 2024 iz Du Nouy ring method: <https://www.kruss-scientific.com/en/know-how/glossary/du-nouey-ring-method>

MinuteLaboratory. (22. januar 2013). The secret of the water drop - drop oscillation || MinuteLaboratory #13. YouTube. Pridobljeno 14. januar 2024 iz <https://www.youtube.com/watch?v=WZAzs5mdLm0>

OpenProf. (2024). Pridobljeno 16. Januar 2024 iz Površinska napetost: https://si.openprof.com/wb/povr%C5%A1inska_napetost?ch=1176#:~:text=napetosti%20izbranih%20kapljevin.-,Kapljevina,0%2C47,-Povr%C5%A1inska%20napetost%20nam

OpenProf. (2024). Pridobljeno 16. Januar 2024 iz Površinska napetost: https://si.openprof.com/wb/povr%C5%A1inska_napetost?ch=1176#:~:text=napetosti%20izbranih%20kapljevin.-,Kapljevina,0%2C47,-Povr%C5%A1inska%20napetost%20nam

Roa, I., Renoult, M. C., Dumouchel, C., & Brändle de Motta, J. C. (30. maj 2023). *Droplet oscillations in a turbulent flow*. Pridobljeno 14. januar 2024 iz Frontiers in Physics: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphy.2023.1173521/full>

Rovšek, B., & Kušar, T. (2005). Sedmi in osmi člen verige eksperimentov. *Presek*, 22-23. Pridobljeno iz <http://www.presek.si/33/1615-Rovsek-Kusar.pdf>

Satcitananda podjetje za proizvodnjo, trgovino in izobraževanje d.o.o., Ljubljana. (2024).

Površinska napetost. Pridobljeno 5. februar 2024 iz OpenProf.com:

https://si.openprof.com/wb/povr%C5%A1inska_napetost?ch=1176

8 VIRI SLIK

Slika 1: Osebni arhiv avtorjev

Slika 2: Osebni arhiv avtorjev

Slika 3: Osebni arhiv avtorjev

Slika 4: Osebni arhiv avtorjev

Slika 5: Osebni arhiv avtorjev

Slika 6: *LibreTexts Chemistry*. (brez datuma). Pridobljeno 16. Januar 2024 iz Surface tension:

https://chem.libretexts.org/@api/deki/files/128289/clipboard_ec0f0ded0ebd2efc9b1c0709dde67efab.png?revision=1

Slika 7: Learning, T. (2020). *What are the two formulae of soap and detergent?* Pridobljeno 5.

januar 2024 iz Topper Learning:
<https://images.topperlearning.com/topper/tinymce/imagemanager/files/fff93bcb033132b9c08787acf1204a8b5bdfdb6ba8d415.02488603detergent.PNG>

Slika 8: Osebni arhiv avtorjev

Slika 9: Osebni arhiv avtorjev

Slika 10: Osebni arhiv avtorjev

Slika 11: Osebni arhiv avtorjev

Slika 12: Osebni arhiv avtorjev

Slika 13: Osebni arhiv avtorjev

9 PRILOGA

9.1 Priloga 1

1. IGLA 1

d [mm]	r [mm]	Δ r [mm]
5,08	2,54	0,00
5,05	2,53	0,01
5,17	2,59	0,05
5,07	2,54	0,00
5,13	2,57	0,03
4,96	2,48	-0,06

$$\bar{d} = 5,08 \text{ mm}$$

$$r = 2,54 \pm 0,03 \text{ mm}$$

$$\bar{r} = 2,54 \text{ mm}$$

$$r = 2,54 (1 \pm 1,2 \%) \text{ mm}$$

2. IGLA 2

d [mm]	r [mm]	Δ r [mm]
4,82	2,41	-0,05
4,99	2,50	0,04
4,79	2,40	-0,06
5,05	2,53	0,07
4,76	2,38	-0,08
5,02	2,51	0,05

$$\bar{d} = 4,91 \text{ mm}$$

$$r = 2,46 \pm 0,06 \text{ mm}$$

$$\bar{r} = 2,46 \text{ mm}$$

$$r = 2,46 (1 \pm 2,5 \%) \text{ mm}$$

3. IGLA 3

d [mm]	r [mm]	Δ r [mm]
4,37	2,19	0,11
4,00	2,00	-0,08
4,02	2,01	-0,07
4,23	2,12	0,04
4,00	2,00	-0,08
4,26	2,13	0,05

$$\bar{d} = 4,15 \text{ mm}$$

$$r = 2,08 \pm 0,07 \text{ mm}$$

$$\bar{r} = 2,08 \text{ mm}$$

$$r = 2,08 (1 \pm 3,4 \%) \text{ mm}$$

4. IGLA 4

d [mm]	r [mm]	Δ r [mm]
3,91	1,96	0,07
3,80	1,90	-0,01
3,92	1,96	0,07
3,91	1,96	0,07
3,37	1,69	-0,20
3,72	1,86	-0,03

$$\bar{d} = 3,77 \text{ mm}$$

$$r = 1,89 \pm 0,03 \text{ mm}$$

$$\bar{r} = 1,89 \text{ mm}$$

$$r = 1,89 (1 \pm 1,6 \%) \text{ mm}$$

5. IGLA 5

d [mm]	r [mm]	Δ r [mm]
3,68	1,84	-0,01
3,35	1,68	-0,17
3,84	1,92	0,07
3,73	1,87	0,02
3,85	1,93	0,08
3,72	1,86	0,01

$$\bar{d} = 3,70 \text{ mm}$$

$$\bar{r} = 1,85 \text{ mm}$$

$$r = 1,85 \pm 0,07 \text{ mm}$$

$$r = 1,85 (1 \pm 3,8 \%) \text{ mm}$$

	\bar{d} [mm]	\bar{r} [mm]	Δr [mm]	δr [%]
IGLA 1	5,08	2,54	0,03	1,17
IGLA 2	4,91	2,46	-0,06	-2,44
IGLA 3	4,15	2,08	-0,07	-3,37
IGLA 4	3,77	1,89	-0,03	-1,59
IGLA 5	3,70	1,85	0,07	3,79

9.2 Priloga 2

	\bar{v}_1 [mm]	\bar{D}_1 [mm]	\bar{v}_2 [mm]	\bar{D}_2 [mm]
IGLA 1	6,12	4,16	4,13	6,14
IGLA 2	5,32	4,43	4,43	5,32
IGLA 3	5,08	3,83	3,87	5,05
IGLA 4	4,49	3,42	3,41	4,54
IGLA 5	4,42	3,29	3,30	4,41

\bar{v}_1 ... Višina podolgovatega sferoida

\bar{D}_1 ... Širina podolgovatega sferoida

\bar{v}_2 ... Višina sploščenega sferoida

\bar{D}_2 ... Širina sploščenega sferoida

9.3 Priloga 3

$\nu_{izmerjena}$ [Hz]	$\Delta\nu_{izmerjena}$ [Hz]	$\delta\nu_{izmerjena}$ [Hz]
27	2	0,07
29	3	0,10
38	3	0,08
43	3	0,07
46	4	0,09

$\nu_{izračunana}$ [Hz]	$\Delta\nu_{izračunana}$ [Hz]	$\delta\nu_{izračunana}$ [Hz]
30	1	0,03
32	1	0,03
41	2	0,05
47	1	0,02
49	3	0,06

9.4 Priloga 4

	\bar{r} [mm]	t_0 [s]	t'_0 [s]
RADIJ 1	2,54	$0,037 \pm 0,003$	$0,51 \pm 0,01$
RADIJ 2	2,46	$0,034 \pm 0,003$	$0,47 \pm 0,01$
RADIJ 3	2,08	$0,026 \pm 0,002$	$0,36 \pm 0,01$
RADIJ 4	1,89	$0,025 \pm 0,002$	$0,31 \pm 0,01$
RADIJ 5	1,85	$0,022 \pm 0,002$	$0,30 \pm 0,01$