

Kotalno trenje pri valjih in kroglah

Doc. dr. Milan Ambrožič in Mojca Milone

Osnovna šola Solkan

Izvleček

Članek opisuje raziskovalno nalogo, s katero je ekipa treh devetošolcev OŠ Solkan dosegla zlato priznanje na slovenskem tekmovanju mladih raziskovalcev na področju fizike in astronomije spomladi 2023 v Murski Soboti. Preverili smo odvisnost kotalnega trenja od polmera teles. Učenci so spuščali aluminijaste tulce in ležajne kroglice različnih polmerov po majhnem klancu in merili, kolikšno pot še naredijo na vodoravnih tleh. Ugotovili smo, da približno velja obratno sorazmerje med polmerom teles in silo kotalnega trenja tako za valje kot za kroglice. Ugotavljali smo še, kako lahko z mazivi zmanjšamo kotalno trenje.

Ključne besede: kolo, kotalno trenje, energijske pretvorbe, ležaj

Rolling Friction of Cylinders and Spheres

Abstract

This article describes research for which a team of three ninth-grade students from the Solkan Primary School won the Golden Plaque in the Slovenian competition of young researchers in physics and astronomy in the spring of 2023 in Murska Sobota. We checked the dependence of rolling friction on the radius of bodies. Students let aluminium tubes and ball bearings with different radii go down the small inclination path and measured the distance they made on horizontal ground. We found an approximate inverse proportion of friction force on the radii of bodies, both for cylinders and spheres. We also tested how the lubricants reduce rolling friction.

Keywords: wheel, rolling friction, energy transformations, bearing.

1 Uvod

Zanimiva raziskovalna naloga lahko dodatno motivira učno uspešne osnovnošolce, na primer pri predmetih fizika in tehnika in tehnologije. Verjetno to velja še toliko bolj, če je takšna naloga povezana z življenjskimi vsebinami ali pa so poskusi nekoliko bolj nenavadni [1-7]. Za današnje mlajše generacije je značilna množična uporaba sodobnih tehničnih pripomočkov, predvsem digitalne tehnologije (DT). Lep zgled je uporaba polarizacijskih očal za doseg globinske ostrine v treh dimenzijah, s čimer bi se bilo mogoče poigrati tudi v osnovni ali srednji šoli [8]. Pri poskusih z drago eksperimentalno opremo se lahko pojavi nevarnost fenomena »črne škatle«, celo pri študentih in učiteljih fizike [9]. To pomeni, da nam naprava prikaže neke rezultate, npr. v obliki številke ali grafov, ne vidimo pa neposredno, kaj se v njej v resnici dogaja, in lahko izgubimo občutek za fiziko v ozadju. Zato ne smemo pozabiti na preproste, nazorne šolske poskuse in na razvijanje tehniških veščin. Dobro premišljena improvizacija z osnovnimi pripomočki je vredna vsaj toliko kot najboljša računalniška animacija ali aplikacija na pametnem telefonu.

Avtorica Milone ima že dolgoletne izkušnje z mentorstvom pri raziskovalnih nalogah osnovnošolcev. Dobro zastavljena naloga tako pritegne »mlade raziskovalce«, da tudi sami prihajajo do zamisli, kaj bi bilo mogoče pri njej še narediti. V tem članku opisuje nalogo, pri kateri so učenci iskali kvantitativno zvezo med velikostjo teles (polmerom valja ali krogle) in trenjem pri kotaljenju. Naloga se morda zdi še zanimivejša, ker se v osnovni šoli omenita drsno in kotalno trenje samo na kratko pri pouku fizike in tehnike, tako da je tema za učence večinoma nova.

Kot je navada pri takšnih nalogah, sva mentorja z učenci postavila naslednja raziskovalna vprašanja:

- Kako vpliva velikost kotalečih se teles na silo kotalnega trenja?
- Ali lahko izboljšamo gibanje, če se odločamo za nakup ležajev z določenimi kotalnimi oblikami različnih dimenzij, in koliko pravilno vzdrževanje vpliva na potek gibanja?
- Katere kotalne ležaje uporabiti za to, da nam trenje čim manj zavira gibanje?

Postavili smo tudi dve delovni hipotezi:

- Pri kotalnih ležajih se trenje zmanjša z velikostjo kotalnih elementov.
- Z mazivom lahko bistveno zmanjšamo kotalno trenje v ležaju.

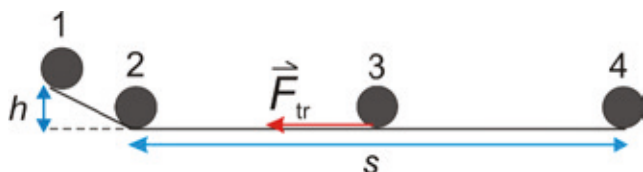
Čeprav so se z nalogo ukvarjali trije za fiziko nadarjeni učenci devetega razreda OŠ Solkan, se zdi še primernejša kot dodaten, motivacijski skupinski poskus za dijake. Lahko pa je tudi popestritev pouka v OŠ. Izvedba naloge je namreč enostavna, brez kakšnih posebnih pripomočkov. To je mogoče narediti pri obravnavi dela in energije, vsaj prvi del naloge, kot je opisana v nadaljevanju, ki je za fiziko zanimivejši.

Mehanizem kotalnega trenja je dokaj kompleksen, glavni vzrok zanj pa je deformacija kolesa na mestu stika s tlemi zaradi lastne teže [10]. Nanj vplivajo tudi deformacija tal, adhezija kolesa s tlemi, mikroskopski zdrsi kolesa itd. Ključni faktor je tudi polmer kolesa, kar se takoj vidi iz poskusa (slika 1), s katerim so učenci proučevali trenje pri kotaljenju.

2 Teorija

2.1 Fizika

Zaradi jedrnatega izražanja bomo okroglemu kotalečemu se telesu rekli kar *kolo*. Pri kotaljenju kolesa po vodoravni podlagi ni drsnega trenja, ker se pojavi sila lepenja, ki preprečuje drsenje. Kotaljenje je gibanje, sestavljeno iz translacije in rotacije okrog središča kolesa. Rotacijska hitrost obodnih točk kolesa je enaka translacijski hitrosti, to je hitrosti središča kolesa. Vendar se kolo na vodoravni podlagi vseeno upočasnjuje zaradi kotalnega trenja. Pri našem poskusu (slika 1) lahko takoj opazimo, da je pot zaustavljanja velikih kroglic (ali koles) precej daljša kot pri majhnih kroglicah. Tako lahko predpostavimo, da je v prvem približku pri kroglicah in valjastih kolesih sila kotalnega trenja obratno sorazmerna z njihovimi polmeri, kar zapišemo z enačbo (2). Na vodoravni podlagi je ustrezna enačba za silo kotalnega trenja (na kratko: *sila trenja*):



Slika 1: Shema poskusa za meritev kotalnega trenja

$$F_{tr} = k_{tr} \cdot F_n, \quad (1)$$

$$k_{tr} = \frac{c}{R}, \quad (2)$$

$$F_n = F_g = mg. \quad (3)$$

Simboli v enačbah (1-3) pomenijo: m je masa kolesa in R njegov polmer, g je težni pospešek. Sile so naslednje: sila trenja F_{tr} , pravokotna sila tal (normalna sila) F_n , ki je za vodoravno podlago po velikosti kar enaka sili teže $F_g = mg$, kaže pa navpično navzgor. Sorazmernostni faktor med silo trenja in normalno silo je brezdimenzijski koeficient trenja k_{tr} . Tega smo izrazili s polmerom kolesa v enačbi (2), kjer je c ustrezeni koeficient z dolžinsko enoto. Koeficient c je odvisen od stičnih materialov, obdelave površin itd. Pri avtomobilskih gumah je znano, da je poleg materiala in asfalta pomembna tudi trdota gum.

Na sliki 1 so s števkami označene značilne lege kotalečega se telesa: (1) začetna lega z največjo potencialno energijo, (2) lega ob vznožju klanca z največjo kinetično energijo, v katero se je pretvorila potencialna, (3) vmesna lega na vodoravni podlagi z zmanjšano hitrostjo in kinetično energijo zaradi sile kotalnega trenja, (4) končna lega, ko se telo ustavi.

Glavni cilj izrazito fizikalnega dela naloge je preverjanje enačbe (2) in potem izračun c . Direktna meritev s silo trenja je prezapletena, zaplete pa se tudi pri matematiki, posebej za osnovnošolsko stopnjo. Če bi uporabili drugi Newtonov zakon, bi bilo v računu preveč neznank. Zato je veliko lažje merjenje prek energij in negativnega dela sile F_{tr} . Pomagamo si s potencialno energijo tako, da kolo spustimo po klancu z znano začetno višino h (slika 1). Potencialna energija W_p se med kotaljenjem po klancu pretvarja v kinetično (na kratkem klancu zanemarimo kotalno trenje), tako da je vsa kinetična energija W_k ob vznožju klanca enaka začetni potencialni. Zato hitrosti ni treba računati; ta račun bi zahteval hkratno obravnavo translacijske in rotacijske kinetične energije. Kolo se naprej giblje po vodoravni podlagi, kjer se vsa začetna energija $W_k = W_p$ pretvori v notranjo zaradi negativnega dela sile trenja A_{tr} . Ker je pri poskusih klanec zelo kratek v primerjavi z vodoravnim delom tira pri ustavljanju, lahko delo sile trenja na klancu zanemarimo, kot smo že omenili. S črko s označimo pot ustavljanja na vodoravni podlagi. Tedaj veljajo zveze:

$$|A_{tr}| = W_p,$$

$$F_{tr} \cdot s = mgh.$$

Za silo trenja uporabimo enačbe (1-3):

$$k_{tr} \cdot F_n \cdot s = mgh,$$

$$\frac{c}{R} \cdot mg \cdot s = mgh,$$

$$s = \frac{Rh}{c}, \quad (4)$$

$$c = \frac{Rh}{s}. \quad (5)$$

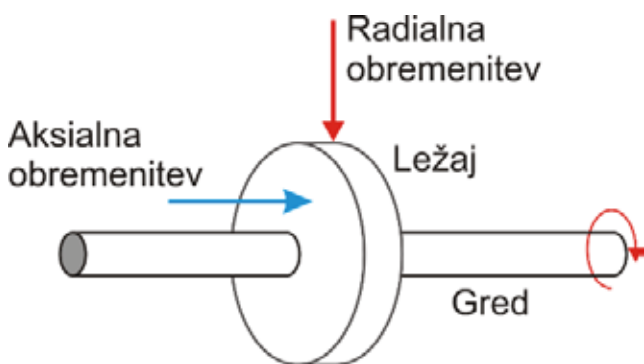
Ključni sta končni enačbi (4) in (5), ki sta obrat ena druge in ki smo ju uporabili za eksperimentalni del raziskave. Enačba (4) pove, da je pot zaustavljanja zaradi kotalnega trenja premo sorazmerna tako s polmerom kolesa kot z višino klanca. To premo sorazmernost z različnimi višinami (pri istem kolesu) in s kolesi z različnimi zunanjimi polmeri (pri isti višini klanca) lahko preverimo s poskusi. Ko preverimo pravilnost enačbe (4), lahko iz enačbe (5) izračunamo koeficient c za različne pare materialov kolo + tla.

2.2 Tehnika in tehnologija

V tehniki razlikujemo nekoristno in koristno trenje, zato ga želimo včasih zmanjšati, drugič pa povečati. Iz lastnih izkušenj vemo, da je pri gibajočih se delih motorja in koles trenje navadno nekoristno, pri zaviranju, na primer z zavorno ploščico, pa koristno. Kotalno trenje nastane pri prenosih moči in gibanju. Zato smo se osredotočili na kotalno trenje, kotalne elemente in njihovo velikost ter možnosti optimalnega zmanjšanja trenja v ležajih. Ležaji so strojni elementi, o katerih se bežno učimo pri predmetu tehnika in tehnologija v osmem razredu. Ležaje uporabljamo za podpore tečajev gredi, osi in da omogočajo vrtenje in pregibanje.

Vrste ležajev

Gibanja zahtevajo različne obremenitve ležajev glede na smer gredi: pravokotno na gred (radialno) ali pa vzporedno z njo (aksialno) (slika 2).



Slika 2: Obremenitve ležaja

Ležaje torej najprej razlikujemo po smeri prenašanja obremenitve:

- radialni (prečni) ležaji, pri katerih deluje obremenitev pravokotno na geometrijsko os gredi in ležajev;
- aksialni (vzdolžni) ležaji, pri katerih deluje obremenitev v osi ležajev;
- kombinirani ležaji, pri katerih delujeta na ležaj prečna in vzdolžna obremenitev.

Ležaje razlikujemo tudi po vrsti trenja: drsni in kotalni ležaji. Drsni ležaji delujejo po načelu primarnega trenja in jih v osnovi podpira mazanje, kotalni pa na principu kotalnega trenja kotalnih elementov, kjer je manj mazalnega učinka. Naše raziskovanje je bilo usmerjeno v kotalne ležaje.

Kotalni ležaji

Ti ležaji so sestavljeni strojni elementi za prenos vrtenja in njihova uporaba je široka. Večina jih je sestavljena iz notranjega in zunanjega obroča, kotalnih elementov in kletke. Kotalni element, največkrat kroglica in valjček, je v kletki med obročema. Kotalni ležaji imajo veliko prednosti pred drsnimi: imajo dober izkoristek, so preprosto nadomestljivi in poceni, zavzemajo pa malo prostora. Zato jih uporabljamo veliko več kot drsne ležaje. Po obliki kotalnih elementov so poleg krogličnih in valjnih ležajev v rabi še stožčasti, sodčkasti in iglični. Kroglični in valjni ležaji prenašajo predvsem radialne obremenitve, prikazane zgoraj, za prenos aksialnih obremenitev pa uporabljamo stožčaste ležaje pa tudi kroglične ležaje z navpično postavljeno kletko.

Kotalni ležaji podpirajo strojne elemente (npr. gredi, osi ali kolesa). Vzdržujejo nizko trenje, s tem pa znižajo hrup, pregrevanje, porabo energije in obrabe. Kroglični radialni ležaji se pogosto uporabljajo v gospodinskih aparatih. Po navadi so del različnih električnih motorjev: gospodinskih in strojnih pripomočkov. Sposobni so delovanja pri visokih hitrostih. So v večini gospodinskih in obdelovalnih strojev, prevoznih sredstvih itd. Kot pomanjkljivosti kotalnih ležajev velja omeniti opletanje, tresenje, hrupnost pri morebitnih poškodbah kotalnih elementov, težjo montažo, občutljivost na temperaturne spremembe ter nabiranje prahu in umazanije.

3 Opis poskusov

Slika 4 prikazuje fotografijo poskusa z nagnjeno podlago (*klancem*), izdelano za ta poskus v šoli. Na leseni podpori z dvema višinama h (5 cm in 10 cm) sloni nagnjena lepenka. Poskuse smo izvajali na šolskem hodniku. Tako sta bili stični površini umetna masa in kovina. Kovinske



Slika 3: Prikaz poskusa s spuščanjem kovinskih tulcev po klanecu

tulce smo izrezali iz dolgih aluminijastih cevi z različnimi polmeri, kroglice pa smo pobrali iz krogličnih ležajev. Merjene poti na vodoravnih tleh so bile po več metrov oziroma veliko daljše od klanca, tako da je bila predpostavka o zanemarljivem delu kotalnega trenja na klanecu upravičena. Za vsak valj in kroglico je bila narejena meritev poti s po petkrat, da so bili rezultati zanesljivejši. Tako smo lahko izračunali povprečno vrednost poti in ocenili mersko negotovost.

Uporabili smo štiri valje s polmeri 3 mm, 7 mm, 8 mm in 14 mm ter tri kroglice s polmeri 2,5 mm, 3 mm in 5 mm, izmerimo jih npr. s kljunastim merilom. Vsa ta telesa so učenci spustili z obeh višin klanca: 5 cm in 10 cm. Pri votlih valjih so pomembni samo zunanji polmeri. Valje smo po velikosti polmerov oštevilčili od 1 do 4, krogle pa od 1 do 3.

V drugem delu poskusov, bolj povezanem s tehniko mazanja ležajev, smo tako za njihovo zaščito kot za zmanjšanje trenja uporabili dve »mazivi«: namensko mazivo za ležaje in olivno olje. Da ne bi umazali tal, smo poskuse izvedli drugače: s prelomljenim aluminijastim žlebom z U-profilom (slika 5). Vzeli smo samo kroglici premerov 6 mm in 13 mm. Nagnjeni del (klanec) je bil dolg 10 cm, vodoravni del žleba pa precej daljši. Nagib klanca je bil dokaj majhen in smo ga določili z več zaporednimi poskusi, tako da sta se obe kroglici ustavili na vodoravnem delu žleba in nista padli na tla. Poti namazanih kroglic smo primerjali s tistimi brez mazanja.

4 Rezultati raziskave

Prvi del poskusov

Rezultati meritev poti za valje in kroglice na šolskem hodniku so prikazani v tabelah 1–4. Najprej primerjajmo poti istega valja ali kroglice pri dveh različnih vrednostih višine klanca h , ki sta v razmerju 2 : 1. Pri kroglicah je v skladu z enačbo (4) ustrezno razmerje poti na vodoravni podlagi bližje tej vrednosti kot pri valjih, morebitno razlago pa podajamo spodaj. Povprečje v predzadnjem stolpcu tabel pomeni povprečje petih meritev poti. Negotovost pa ocenjeno negotovost, to je največji odmik meritev od povprečja.



Slika 4: Prikaz poskusa z mazanjem kroglic

Analizirajmo nekaj podatkov za valje. Na primer količnik med polmeroma valjev št. 4 in 3 je enak 1,75, medtem ko je ustrezno razmerje povprečnih dolžin s pri spustu z višine 5 cm enako 1,30, pri spustu z višine 10 cm pa 1,21. Količnik med polmeroma valjev št. 4 in 1 je enak 4,67, medtem ko je ustrezno razmerje povprečnih dolžin s pri spustu z višine 5 cm enako 3,35, pri spustu z višine 5 cm pa 3,87. Najverjetnejši vzrok za odmike eksperimentalnih ugotovitev od teorije je rahel nagib tal hodnika, ki se mu ne moremo popolnoma izogniti. Vzrok pa je lahko tudi ne dovolj natančna meritev zunanega polmera valjev ali pa njihova rahla koničnost. Glede na podano negotovost za pot v zadnjem stolpcu je namreč meritev poti dovolj natančna. Za oceno koeficienta c pri valjih vzamemo najdebelejši valj in večjo višino spusta; iz podatkov $h = 10$ cm, $R = 14$ mm in $s = 565$ cm iz tabele 2 izračunamo z enačbo (5) $c = 0,25$ mm, koeficient kotalnega trenja pa iz enačbe (2) $k_{tr} = \frac{c}{R} = 0,02$.

Rezultati so pri kroglicah podobni kot pri valjih. Če pa primerjamo odvisnost poti od začetne višine, je premo sorazmerje precej bližje kot pri valjih. Na primer, za povprečni poti največje kroglice, 1016 cm in 492 cm,

dobimo količnik 2,07. Dodatni morebitni vzrok, zakaj imamo pri kroglicah po teoriji natančnejši rezultat kot pri valjih, je, da se lahko valji gibljejo »nesimetrično«, to je, ne točno pravokotno na os valja. Najverjetnejši vzrok za takšno nesimetrično kotaljenje valja je, da je nekoliko koničen. Primerjajmo še poti kroglic s polmeroma 5 mm in 2,5 mm, tako da je količnik polmerov 2. Opazimo, da večja kroglica res naredi približno dvakrat daljšo pot: pri $h = 5$ cm je količnik povprečnih poti enak 1,74, pri $h = 10$ cm pa 1,83. Za oceno koeficienta c pri kroglicah vzamemo najdebelejšo kroglico in večjo višino spusta; iz podatkov $h = 10$ cm, $R = 5$ mm in $s = 1016$ cm iz tabele 4 izračunamo z enačbo (5) $c = 0,05$ mm, petkrat manj kot pri poskusih z valji.

Povzemimo ugotovitve o negotovostih meritev in eksperimentalnih pogojih za valje in kroglice. Največja relativna napaka merjenja poti je okrog 10 %, in to pri valju z najmanjšim polmerom. Natančnosti merjenja polmerov nismo posebej preverjali, lahko pa podamo grobo kvalitativno oceno absolutne negotovosti 0,1 mm, kar da največjo relativno negotovost 4 % pri najmanjšem polmeru 2,5 mm. Negotovost pri merjenju višine h lahko ocenimo

Tabela 1: Poti valjev, $h = 5$ cm

Št. (polmer)	Pot (cm)						Negotovost
	1	2	3	4	5	Povprečje	
1. (3 mm)	109	119	115	105	118	113	6
2. (7 mm)	206	214	216	217	206	212	6
3. (8 mm)	300	290	292	290	285	291	9
4. (14 mm)	379	372	373	378	386	378	8

Tabela 2: Poti valjev, $h = 10$ cm

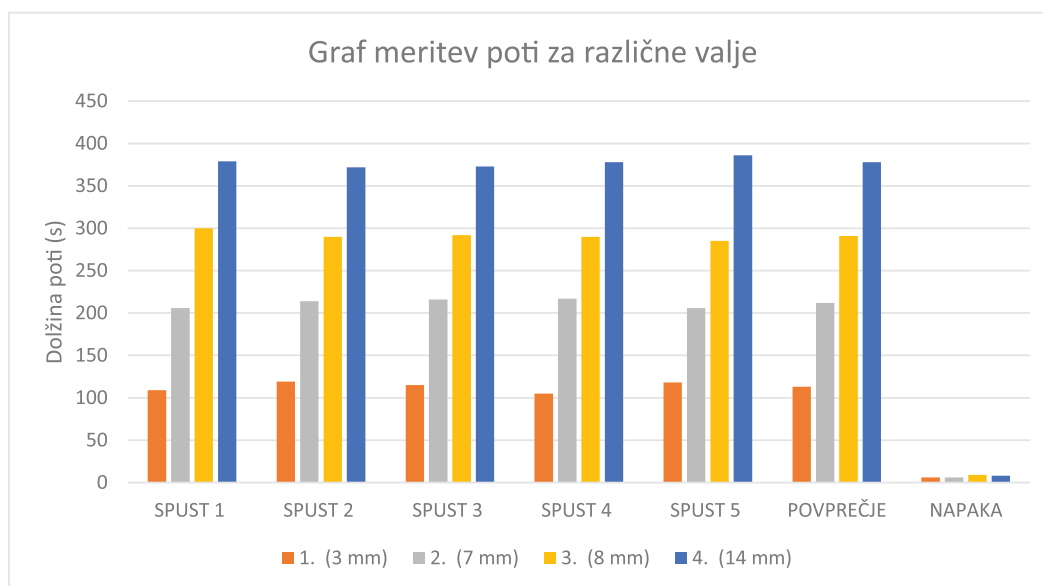
Št. (polmer)	Pot (cm)						Negotovost
	1	2	3	4	5	Povprečje	
1. (3 mm)	147	136	137	147	163	146	17
2. (7 mm)	389	372	391	400	392	389	17
3. (8 mm)	452	465	464	473	482	467	15
4. (14 mm)	602	550	567	533	575	565	37

Tabela 3: Poti kroglic, $h = 5$ cm

Št. (polmer)	Pot (cm)						Negotovost
	1	2	3	4	5	Povprečje	
1. (2,5 mm)	279	284	259	286	302	282	23
2. (3 mm)	381	337	366	402	376	372	35
3. (5 mm)	476	480	491	504	510	492	18

Tabela 4: Poti kroglic, $h = 10$ cm

Št. (polmer)	Pot (cm)						Negotovost
	1	2	3	4	5	Povprečje	
1. (2,5 mm)	519	533	563	580	581	555	36
2. (3 mm)	804	776	884	892	792	893	117
3. (5 mm)	1014	1032	987	1050	999	1016	34



Slika 5: Grafi poti za valje za $h = 5$ cm

na 5 mm, npr. tudi zaradi nenatančne začetne lege spusta po klancu, kar nam da relativno negotovost 10 % pri manjši višini. S slike 4 levo je razvidno, da je vrhnji rob vodoravne podporne letvice nastavljen na višino 5 cm, vendar nam tudi debelina lepenke in njeno štrljenje čez rob prineseta nekaj napake pri tej višini. Vse tri omenjene relativne negotovosti seštejemo in v enačbi (5) dobimo skupno relativno negotovost desne strani okrog 25 %. Za takšen šolski poskus brez posebne merilne opreme je to sprejemljivo.

Kot smo že namignili, pa se lahko tu pojavijo tudi sistematične napake, npr. rahla nagnjenost tal. To bi bilo mogoče dodatno preveriti, če bi postavili klanec drugam, tako da bi se telesa kotalila po tleh v nasprotni smeri. Lahko pa tudi enačba (2) ne velja natančno pri vseh pogojih kotaljenja.

Drugi del poskusov

Pri poskusih z mazanjem kroglic in njihovim spuščanjem po prelomljenem žlebu smo ugotovili naslednje. Primeren kot nagiba klanca je bil 4° . Mazivo za ležaje se je izkazalo neprimerno za ta poskus, saj sta se kroglici zaradi njega lepili na žleb. Poskus pa je dobro uspel z olivnim oljem, vendar je bilo treba odvečno olje odstraniti s čopičem (slika 5). Prav tako smo izvedli po pet spustov in meritev poti za vsako od obeh kroglic in za oba pogoja, nenamazano in namazano kroglico (skupaj 20 meritev). Ko kroglici nista bili namazani, sta bili povprečni poti okrog 10 cm za manjšo kroglico in 50 cm za večjo. To ni v enakem razmerju kot polmera kroglic, vendar pa tudi pogoji niso bili takšni kot prej na klancu. Zato je bil ta poskus bolj kvalitativne narave. Z oljem namazani kroglici sta se zakotalili precej dlje: manjša je naredila v povprečju pot okrog 35 cm, večja pa okrog 70 cm.

Potek tekmovanja

Naslov raziskovalne naloge je bil »Ali velikost kotalnih elementov pogojuje trenje?«. Izvedli so jo učenci devetega razreda Matic Gorjan, Lovro Frančeškin in Matic Stibilj. Učenci so poleg zgoraj prikazanih tabel za pismo in ustno predstavitev naloge pripravili tudi ustrezne stolpčne diagrame. Primer enega od njih pri prvem delu poskusa je prikazan na sliki 6. Tako iz tabel kot iz grafov je lepo razvidno, da je relativna napaka merjenj poti pri petih meritvah dovolj majhna.

Učenci so se z nalogo ukvarjali kakšna dva meseca pred uradnim delom tekmovanj. Prvo predstavitev so imeli v Ajdovščini, drugo pa v Murski Soboti, pri obeh pa jih je spremljala tudi mentorica Mojca Milone. Tekmovanje s predstavitvijo v Ajdovščini je bilo v okviru projekta Labirint, ki ga organizira Center odličnosti COBIK v Ajdovščini, nadaljnja tekmovanja v Murski Soboti pa organizira Zveza za tehnično kulturo Slovenije (ZOTKS). Z dobro oceno naloge v tekmovanju Labirint so se učenci uvrstili na tekmovanje v Murski Soboti in tam na svojem področju (fizika in astronomija) dosegli zlato priznanje.

5 Sklep

Ugotovili smo, da se sila kotalnega trenja za valje in kroglice zmanjšuje s polmerom. To smo preverili z dolžino poti, ki jo kotaleče se telo naredi na vodoravni podlagi, preden se ustavi. Pomagali smo si z računom pretvorbe potencialne energije v notranjo zaradi negativnega dela sile kotalnega trenja. Izračunali smo ustrezni koeficient c , ki ima v skladu z enačbama (2) in (5) dolžinske dimenzije: okrog 0,25 mm za valje in 0,05 mm

za kroglice. Za kroglice bolje velja približna obratna sorazmernost med silo kotalnega trenja in polmerom kot za valje, verjetno zaradi eksperimentalnih pogojev. Sem lahko spadajo negotovosti meritev, nagib tal, morda rahla koničnost valjev in nesimetrično gibanje pri valjih. Pokazali smo tudi, da ustrezno mazanje kotalnih elementov zmanjša kotalno trenje.

Prvi, bolj fizikalni del naloge, bi bilo mogoče oblikovati še drugače. Na primer, če je premalo prostora za dolgo pot kotalečih se teles, se lahko nasproti prvemu klancu, s katerega telesa spustimo, postavi klanec, po katerem

se telesa povzpnejo do manjše višine v primerjavi s prvim klancem, vmes pa je točno določena vodoravna pot, dolga npr. 1 m. Zgornje enačbe je treba samo nekoliko preurediti in računati z razliko potencialnih energij pri obeh klancih. Vendar bi se tu pri valjih lahko pojavile težave, ker radi nekoliko zavijejo z ravne poti. Tedaj bi se v drugi klanec ne vzpenjali poravnano. Za kroglice bi se takšna preureditev poskusa verjetno bolje obnesla. Dalje, za kroglice lahko namesto ravne nagnjene podlage uporabimo nagnjen trikotni žleb, ki jih vedno usmeri v točno določeno smer.

Viri

- [1] Robič, D. (2017). *Motivacija učencev v procesu vnašanja sodobnih znanstvenih dognanj v pouk fizike osnovne šole. Magistrsko delo.* Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Oddelek za fiziko, Maribor.
- [2] *Razvoj naravoslovnih kompetenc.* Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Maribor. Dostopno na: <http://kompetence.uni-mb.si/> (2. 2. 2024).
- [3] Minner, D. D., Levy, A. J., in Century, J. (2010). Inquiry-based science instruction – what is it and what does it matter? Results from a research synthesis years 1984 to 2002. *Journal of Research in Science Teaching*, 47(4), 474–496.
- [4] Repnik, R. (2012). *Uspešnost tradicionalnih učnih metod pri vnašanju sodobnih znanstvenih dognanj v osnovnošolski pouk fizike. Doktorska disertacija.* Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Oddelek za fiziko, Maribor.
- [5] Repnik, R., Ambrožič, M. (2018). Practical School Experiments with the Centre of Mass of Bodies. *CEPS Journal*, 8(1), 97–116.
- [6] Milone, M., Ambrožič, M., Batagelj, O., Batagelj, A. (2018). Tehnični dan Fizika v šoli. *Fizika v šoli*, 23(2), 16–24.
- [7] Ambrožič, M., Milone, M. (2022). Pouk fizike v naravi. *Fizika v šoli*, 27(2), 52–59.
- [8] Bernad, P., Vaupotič, N., Repnik, R. (2019). Teaching the physics behind a 3D cinema through experiments supported by ICT. *Mipro 2019, 42nd International Convention*, May 20–24, 2019, Proceedings, 823–829.
- [9] Bernad, P., Šic, D., Repnik, R., Osrajnik, D. (2021). Development of Measurement Systems with the BBC Micro:bit. *Mipro 2021, 44th International Convention*, Sept. 27–Oct. 1, 2021, Proceedings 911–916.
- [10] Wikipedia, Rolling resistance. Dostopno na: https://en.wikipedia.org/wiki/Rolling_resistance#Physical_formulae (2. 2. 2024).