

PODROČJE

FIZIKA

Raziskovalna naloga

ALI VELIKOST KOTALNIH ELEMENTOV POGOJUJE TRENJE?

AVTORJI: Matic Gorjan, Lovro Frančeškin, Matic Stibilj, učenci 9.r

Mentorja: Milan Ambrožič in Mojca Milone

Šola: OŠ Solkan



Šol. leto: 2022/23

POVZETEK

Za prihod v šolo in v prostem času mladi pogosto uporabljamo alternativna in ekološka prevozna sredstva, ki nam rabijo za igro in za to, da si skrajšamo čas potovanj. Med njimi so skiroji, rolke in kolesa, pri katerih uporabljamo strojne elemente - ležaje. Začelo nas je zanimati, kakšno funkcijo imajo ležaji pri olajšanju gibanja in od česa je odvisno njihovo optimalno delovanje. S to raziskavo smo najprej preverili znano odvisnost kotalnega trenja koles (npr. pri kolesih in avtomobilih) od njihovega polmera. Zato smo se lotili poskusov z kovinskimi tulci različnih dimenzij, ki smo jih izdelali iz daljših aluminijastih cevi različnih zunanjih polmerov. Preizkusili smo veljavnost zveze med trenjem in polmerom tudi za kroglice. Uporabili smo šolsko znanje o potencialni energiji in o delu znane sile. Ugotovili smo, da omenjeni fizikalni zakon dobro velja tako za valje kot za kroglice. Zanimanje pa nas je gnalo tudi dlje, saj smo hoteli ugotoviti, kako se lahko znebimo izgub pri trenju, če površine namažemo z mastmi ali olji. Ta znanja smo v zaključku navezali na izbiro najprimernejših ležajev v prevoznih sredstvih in na njihovo vzdrževanje za optimalno delovanje.

ZAHVALA

Zahvaljujemo se mentorjema dr. doc. fizike Milanu Ambrožiču in učiteljici tehnike in fizike Mojci Milone za spodbudo in pomoč, ter vodstvu šole za nudenje prostora in potrebnih pripomočkov.

Kazalo vsebine

NASLOVNICA-OSNOVNI PODATKI	1
POVZETEK.....	2
UVOD	4
TEORETIČNI DEL	5
EKSPERIMENTALNI DEL	14
VIRI	23

Najprej smo poiskali informacije iz spletnih, pisnih in človeških virov, da bi se podrobneje seznanili z silo, ki zavira gibanje. Pri pouku tehnike in tehnologije ter predvsem fizike smo se že seznanili z drsnim trenjem, medtem ko podrobnejša obravnava kotalnega trenja ni predmet pouka v osnovni šoli, čeprav je kotalno trenje pri vozilih pomembno. V tej raziskavi smo hoteli preveriti, ali je kotalno trenje odvisno od oblike in velikosti kotalečega predmeta. Želeli smo tudi izmeriti koeficient trenja (ustrezni dimenzijski koeficient c) ter ugotoviti, kako je sila trenja povezana s polmerom okroglega predmeta (valjčka ali kroglice), s katerim smo opravljali poskuse. Zanimala nas je tudi razlika med potjo, ki jo opravi kotaleči element, če podlaga ni namazana z mastmi ali olji in ko je podlaga namaščena.

Ukvarjali smo se z naslednjimi raziskovalnimi vprašanji:

- **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 v kolikšnem merilu vpliva pravilno vzdrževanje na potek gibanja?**

Našo raziskavo in njen potek sta usmerjali **dve hipotezi**:

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

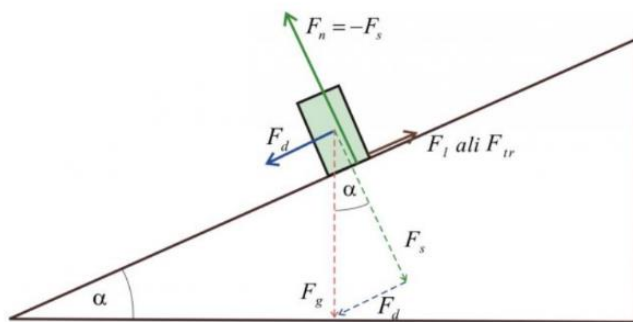
Kot zanimivost dodajmo še en vidik kotalnega trenja, ki pa ni neposredno vezan na našo raziskavo. Pri kotalnem trenju si najlažje predstavljamo kotaljenje pnevmatskih koles po površini. Kotalno trenje je neposredno povezano s porabo goriva. Dobili smo podatek (vir 4), da se pri približnem povečanju trenja za 30 % poveča poraba goriva za 3 % do 5 %. Dejavniki, ki vplivajo na kotaljenje pnevmatik v stiku s tlemi, so tudi širina, višina, material in tlak v pnevmatiki, saj gre v tem primeru za mehki material.

2 TEORETIČNI DEL

Trenje je fizikalni pojav, ki deluje med dvema ploskvama teles pri drsenju ali kotaljenju. Ploskvi druga na drugo delujeta s silo, ki zavira gibanje. Zaradi trenja se zato del mehanske energije pretvori v notranjo. Sila trenja je odvisna od pravokotne (normalne) komponente sile, s katero pritiskata površini teles ob relativnem gibanju druga na drugo, pa tudi od koeficienta trenja (k_{tr}). Ta koeficient se razlikuje glede na hrapavost in materiala, iz katerih sta narejeni stikajoči se podlagi. Je pa tudi odvisen od vrste trenja.

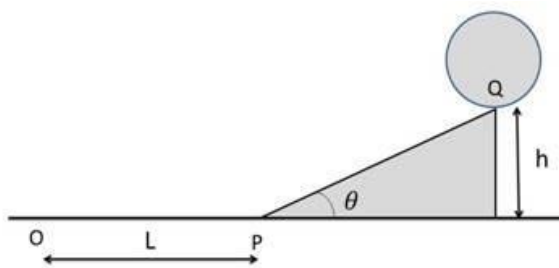
Razlikujemo več vrst lepenja/trenja:

- **Lepenje** je trenje v skrajnem primeru, ko telesi v stiku še mirujeta eno glede na drugo.
- **Drsno trenje** se pojavi, ko telesi drsita eno glede na drugo.
- **Kotalno trenje** je trenje, kjer se eno telo kotali po drugem.



Slika 1: Lepenje in drsno trenje ($F_d = F_l$; $F_d > F_{tr}$)

Na sliki 1 je prikazan zgled lepenja ali drsnega trenja pri mirovanju ali gibanju klade po klancu.



Slika 2: Kotalno trenje. Vir za sliki 1 in 2:

<https://www.matematicamente.it/forum/viewtopic.php?p=8294834>

Slika 2 prikazuje kotalno trenje na klancu in vodoravni podlagi. Pri primerjavi sil razstavimo silo teže F_g na dinamično komponento F_d in statično komponento F_s . Normalna sila tal na sliki 1 je nasprotno enaka statični komponenti. Pri mirovanju je velikost sile lepenja enaka dinamični komponenti teže. Če ta komponenta zaradi velikega nagiba klanca preseže maksimalno silo lepenja, potem klada drsi in je dinamična komponenta večja od sile drsnega trenja.

Slika 3 prikazuje zglede lepenja in trenja v življenju.

Lepenje	Drsno trenje	Kotalno trenje
 https://www.zurnal24.si/avto/glavne-napake-pri-voznji-v-klanec-358284	 https://siol.net/sportal/zimski-sporti/liubitelji-alpskega-smucanja-iz-avstrije-prihaja-dobra-novica-563576	 https://citymagazine.si/najboljs-elektricne-rolke-za-rolkanje-brez-znojenja/

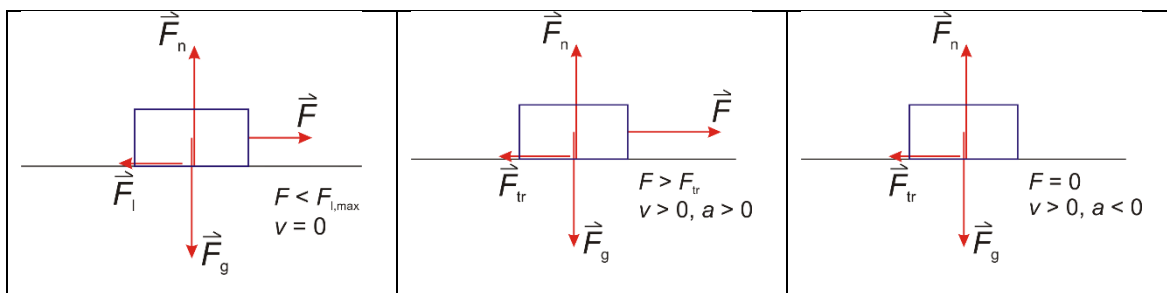
Slika 3: Zgledi lepenja in trenja

Sile pri drsnem lepenju ali trenju

Najprej opišimo drsno lepenje ali trenje. Velikost maksimalne sile lepenja ali sile trenja je odvisna od dveh količin:

- 1) BREZDIMENZIJSKEGA KOEFICIENTA LEPENJA ALI TRENJA (k_l ali k_{tr})
- 2) NORMALNE KOMPONENTE SILE PODLAGE F_n .

Pri fizikalni obravnavi problema se omejimo na mirovanje ali gibanje telesa na vodoravni podlagi, kjer je sila F_n po velikosti kar enaka sili teže telesa F_g . Silo lepenja za popolni opis omenimo samo še tukaj. Biti moramo pozorni in silo lepenja F_l pravilno obravnavati. Ta sila se pojavi, ko hočemo npr. s silo F povleči kvader po podlagi, vendar je sila premajhna za premik. Sila lepenja se spreminja s silo F , tako da ji je ves čas enaka po velikosti: $F_l = F$ (ravnovesje sil; slika 4 levo).



Slika 4: Lepenje in drsno trenje – sile; simbola v in a označujeta hitrost in pospešek klade, njun predznak pa podaja smer vektorjev.

Vendar pa obstaja največja mogoča sila lepenja $F_{l,max}$, za katero velja:

$$F_{l,max} = k_l \cdot F_g.$$

Ko sila F preseže $F_{l,max}$, potem kvader začne drseti po podlagi. Tedaj imamo namesto sile lepenja silo trenja, za katero pa predpostavimo, da ni odvisna od vlečne sile $F_{tr} = k_{tr} \cdot F_g$, čeprav to ni natančno res (slika 4 na sredini). Sile niso več v ravnovesju, razen ko sta sili F_{tr} in F enako veliki. Navadno privzamemo, da sta koeficienta k_l in k_{tr} približno enaka. Sila trenja je skoraj neodvisna od velikosti stičnih ploskev opazovanih teles. Čeprav vemo, da kažeta sili lepenja in trenja v nasprotni smeri od vlečne sile, ju bomo pisali s pozitivnim predznakom, ker bomo računali samo njuni velikosti.

Kaj se torej dogaja s silami in klado, ko vlečno silo F postopoma povečujemo od vrednosti 0 naprej?

- Pri $F = 0$ ni niti sile lepenja niti sile trenja in klada miruje.
- Pri $0 < F < F_{l,max}$ obstaja sila lepenja, ki pa se tudi povečuje, tako da je $F_l = F$. Klada še vedno miruje (slika 4 levo).
- V mejnem primeru $F = F_{l,max}$ je klada tik pred zdrsom.
- Za $F > F_{l,max} \approx F_{tr}$ pa se klada pospešeno giblje v desno zaradi neravnovesja sil.

Imamo pa še neko značilno gibanje (slika 4 desno). Lahko klado naenkrat potisnemo z neko začetno hitrostjo po podlagi, tako da se začne gibati v desno, ni pa nobene vlečne sile F . Tedaj klado zaustavlja samo sila trenja F_{tr} , tako da je gibanje enakomerno pojemajoče, dokler se klada po določeni poti s ne ustavi. Mi se bomo pri poskusih srečali s to tretjo možnostjo, vendar za kotalno trenje.

Naš eksperiment se navezuje na naslednjo fizikalno razlago.

Če opazujemo gibanje kotalečega telesa po vodoravni površini, npr. kolesa po podlagi brez drsenja, ugotovimo, da ni drsnega trenja, pojavi pa se sila lepenja, ki preprečuje drsenje. Pri popolnem kotaljenju ni zdrsov, zato trenutna točka kolesa (v dvodimenzionalni sliki), ki je v stiku s podlago, ta trenutek miruje. To pomeni, da je obodna hitrost točk kolesa kar

enaka hitrosti vodoravnega premikanja središča kolesa. Vendar pa se kolo vseeno upočasnjuje zaradi kotalnega trenja. Na vodoravni podlagi je ustrezna enačba za silo 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 = masa kolesa,

R = polmer kolesa,

g = težni pospešek,

F_n je normalna (pravokotna) sila vodoravnih tal na kolo,

k_{tr} = brezdimenzijski koeficient trenja pri kotaljenju,

c = ustrezni dimenzijski koeficient (z dolžinsko enoto),

F_{tr} = sila kotalnega trenja.

Ključna je enačba (2), ki pove, da se kotalno trenje zmanjšuje obratno sorazmerno s polmerom kolesa. Koeficient c pa je odvisen od stičnih materialov, obdelave površin itd.

Med cilji raziskovalne naloge je predvsem preverjanje enačbe (2) in izračun materialnega koeficienta c . Direktna meritev s silo trenja je preveč zapletena. Če bi uporabili drugi Newtonov zakon, bi bilo v računu preveč neznank. Zato je veliko lažje in zanesljivejše merjenje prek negativnega dela sile kotalnega trenja.

Pomagamo si lahko s potencialno energijo, tako da telo spustimo pa klancu z znano začetno višino (slika 5).

Potencialna energija se med kotaljenjem po klancu res pretvarja v kinetično, vendar vemo, da je vsa kinetična energija ob vznožju klancu enaka začetni potencialni. Telo se naprej giblje po vodoravni podlagi, kjer se vsa začetna energija (ali potencialna) pretvori v notranjo zaradi negativnega dela sile trenja. Ker je pri poskusih klanec zelo kratek v primerjavi z vodoravnim delom tira pri ustavljanju, lahko delo sile trenja na klancu zanemarimo.

h = začetna višina

s = pot na vodoravni podlagi (na kateri se telo ustavi)

Tedaj velja:

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

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

Za silo trenja uporabimo enačbe (1–3):

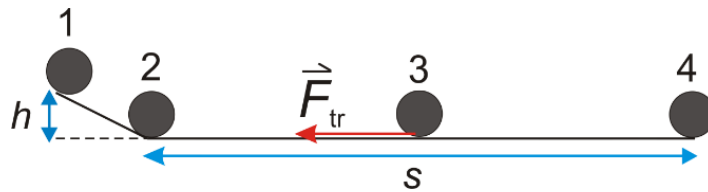
$$k_{tr} \cdot F_n \cdot s = mgh$$

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

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

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

Enačbi (4) in (5), ki nam ju je obrazložil mentor M. Ambrožič, smo uporabili za eksperimentalni del raziskave. Enačba (4) pove, da je pot zaustavljanja zaradi kotalnega trenja premo sorazmerna tako s polmerom telesa kot z višino klanca. To premo sorazmernost z različnimi višinami (pri istem telesu) in s telesi 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 (telo + tla).



Slika 5: Shema poskusa

Na sliki 5 so s številkami označene značilne lege kotalečega 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.



Slika 6: Fotografija poskusa

Slika 6 prikazuje fotografijo poskusa z nagnjeno podlago, izdelano za ta poskus v šoli. Poskuse smo izvajali na šolskem hodniku, ki je prekrit z linolejem. Tako sta bili stični površini umetna masa + kovina.

Poudarimo še, da čeprav bi lahko izmerili tudi mase kotalečih teles, tega podatka pri naši raziskavi ne potrebujemo. Masa se namreč pri zgornji izpeljavi enačbe (4) krajša. To je zato, ker sta z njo premo sorazmerna tako začetna potencialna energija kot tudi delo sile trenja. Po enačbah (4) in (5) so tako ključni podatki polmer telesa (v našem primeru valjčka ali kroglice), začetna višina na klancu in pot ustavljanja na vodoravni podlagi.

Tehnična plat uporabe kotalnega trenja

V tehniki razlikujemo koristno trenje in nekoristno trenje, zato želimo včasih trenje zmanjšati, včasih 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 (slika 7).

Strojni elementi, ki zmanjšujejo trenje pri gibanju



Ležaji so strojni elementi o katerih se bežno učimo pri pouku TIT v 8. r. S spoznavanjem fizike in njenih zakonov pa smo postali radovedni in željni bolj strokovnih odgovorov. Spoznali smo, da ležaje uporabljamo za podpore tečajev gredi, osi in da omogočajo vrtenje, pregibanje.

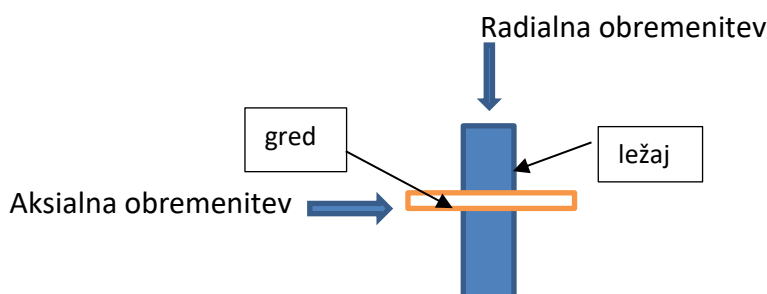
Slika 7: Vrste ležajev

<https://guide.directindustry.com/it/guida-allacquisto-di-un-cuscinetto/>

Pri strojnih napravah in prevoznih sredstvih, igralih lahko opazujemo, kaj se vrti in kaj miruje. Zanimivo je, da se včasih vrtijo notranji deli (gredi) ali se gibljejo zunanji obroči (primer koles); torej ležaji prenašajo zunanje obremenitve z vrtečih se delov na mirujoče in obratno. Spoznali smo, da glede na vrsto trenja obstajajo drsni in kotalni ležaji.

Vrste ležajev

Gibanja zahtevajo drugačne obremenitve gredi: pravokotno na gred (radialno), drugič pa vzporedno z gredjo (aksialno) (slika 8).



Slika 8: Obremenitve ležaja

Ležaje torej delimo 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**, pri katerih delujeta na ležaj prečna in vzdolžna obremenitev.

Že pri pouku tehnike smo poskusili, da če z roko drsamo po površini, ali pod njo položimo valjaste svinčnike, je gibanje pogojeno glede na kotalne elemente in trenje.

Ležaje torej delimo tudi po **vrsti trenja**, ki smo ga spoznali v fiziki. Razlikujemo :

- drsne ležaje,**
- kotalne ležaje.**

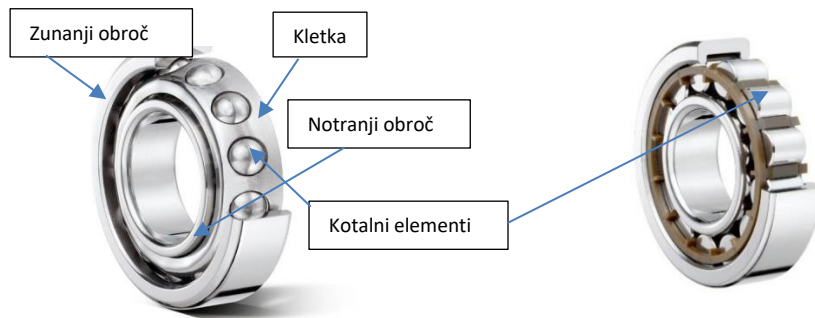
Drsni ležaji delujejo na principu primarnega trenja, ki jih v osnovi podpira mazanje, kotalni pa na principu kotalnega trenja kotalnih elementov, kjer je manj mazalnega učinka. Naše raziskovanje bo usmerjeno prav v kotalne ležaje.

Kotalni ležaji

Ti ležaji so sestavljeni strojni elementi za prenos vrtilnega gibanja in njihova uporabnost je zares široka. Večina kotalnih ležajev je sestavljenih iz notranjega obroča, zunanjega obroča, kotalnih elementov in kletke (slika 9). Njihovo delovanje je na principu kotalečega elementa v kletki, ki je med obema obročema.

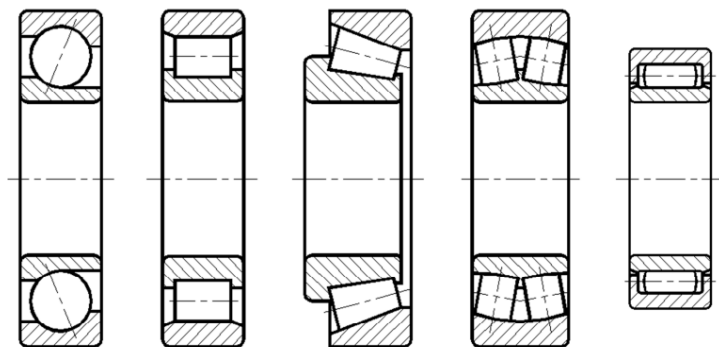
Ti ležaji imajo veliko prednosti pred drsnimi ležaji: imajo dober izkoristek, preprosto vzdrževanje, so nadomestljivi in relativno poceni, zavzamejo malo prostora in zato jih uporabljamo 95 % več kot drsnih ležajev.

Kot pomanjkljivosti velja omeniti: opletanje, tresenje, hrupnost pri morebitnih poškodbah kotalnih elementov, težja montaža, občutljivost na temperaturne spremembe, nabiranje prahu in umazanije.



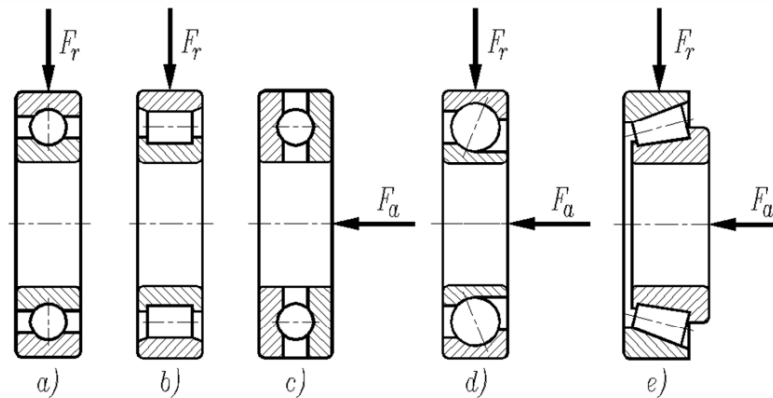
Slika 9: Kroglični ležaj in valjni ležaji <https://guide.directindustry.com/it/guida-allacquisto-di-un-cuscinetto/>

Po obliki kotalnih elementov razlikujemo vrste ležajev (slika 10):



Slika 10: Vrste kotalnih ležajev glede na kotalne elemente a) kroglični, b) valjni, c) stožčasti, d) sodčkasti, e) iglični ležaj

Ilustracija 11 nadzorno prikazuje uporabnost glede na obremenitev različnih ležajev:



Slika 11: Uporabnost in obremenitve različnih ležajev (vir 10 in 11)

<https://guide.directindustry.com/it/guida-allacquisto-di-un-cuscinetto/>

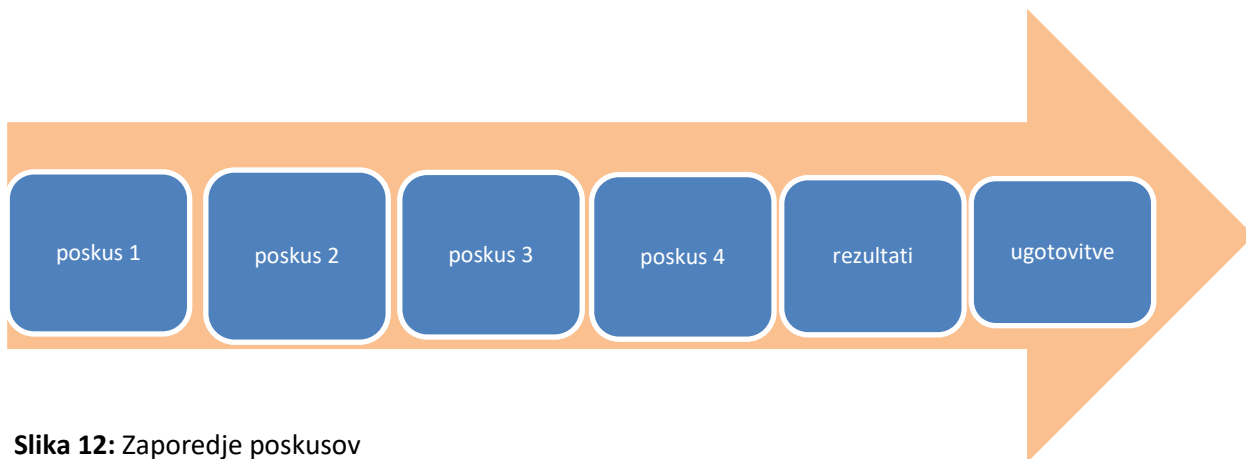
Kroglični in valjni ležaji prenašajo radialne obremenitve, kroglični z vertikalno kletko, in stožčasti pa tudi aksialne obremenitve v smeri gredi vrtenja.

Kotalni ležaji podpirajo stroje 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 gospodinjskih aparatih. Po navadi so del različnih električnih motorjev: gospodinjskih in strojnih pripomočkov. Sposobni so delovanja pri visokih hitrostih. So v vseh gospodinjskih, obdelovalnih strojev, prevoznih sredstvih.

3 EKSPERIMENTALNI DEL

Pri vsakem poskusu smo opredelili, katere količine bodo ostale nespremenjene in katere bodo spremenljivke, da bomo lažje opazovali posledice in s tem pa prihajali do pravih ugotovitev.

Shema poteka poskusov je naslednja (slika 12):



Slika 12: Zaporedje poskusov

IZVEDBA POSKUSA 1

Sprva smo izdelali leseno podporo in klanec, ki nam bo predstavljal klančino pri naših poskusih pri praktičnem delu raziskovalne naloge. Razrezali smo še kovinske valje različnih premerov. Z letvico smo izdelali poličke za pritrjevanje klančine na dveh različnih višinah (slika 13).



Slika 13: Klančina iz vezane plošče. Letvici sta na dveh različnih višinah.

Vsak valj posebej smo označili od »valj 1« do »valj 4« in vsakega spustili po klanecu 5-krat zaradi večje statistične zanesljivosti. Spreminjali smo višino podporne točke od višine 5 cm na 10 cm. Za vseh pet meritev za vsak valj in obe klančini smo nato izračunali povprečje: npr., za meritve 40 cm, 45 cm, 42 cm, 39 cm in 50 cm je povprečje $(40 \text{ cm} + 45 \text{ cm} + 42 \text{ cm} + 39 \text{ cm} + 50 \text{ cm})/5 = 43 \text{ cm}$. Rezultate smo zaokrožili. Podobno smo naredili za kroglice.

Prvi poskus je bil za umeritev in iskanje najboljših eksperimentalnih pogojev in parametrov. Poskusili smo nekaj različnih višin h in nazadnje izbrali dve različni višini klanca za spuščanje kovinskih tulcev: $h = 5 \text{ cm}$ in $h = 10 \text{ cm}$. Ugotovili smo, da je pri vsakem tulcu posebej opravljena pot s na vodoravni podlagi pri višini 10 cm zares večja kot pri višini 5 cm, skladno z enačbo (4) v teoretičnem delu, čeprav zaradi več eksperimentalnih pogojev (npr. ne popolnoma vodoravne podlage) ni natančnega premega sorazmerja med h in s .

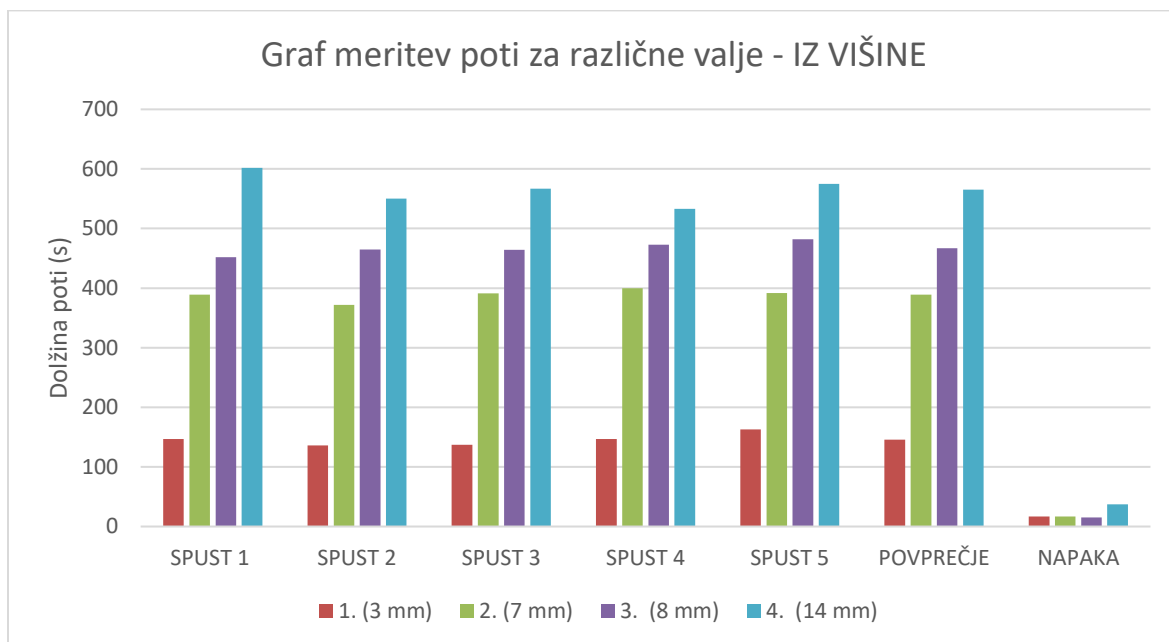
IZVEDBA POSKUSA 2

Pri tem poskusu smo spustili valje z obeh višin in izmerili njihove poti s (slika 14). Grafa 1 in 2 prikazujeta rezultate: v prvem stolpcu so podani polmeri valjev, v drugih stolpcih pa poti po vodoravni podlagi. Povprečje (predzadnji stolpec) smo izračunali iz 5 meritev, kot je opisano zgoraj, napaka (zadnji stolpec) pa pomeni največji odmik neke meritve od povprečja. Iz tabel je razvidno, da je povprečna pot res narašča s polmerom R , v skladu z enačbo (4). Ni pa natančnega premega sorazmerja. Če vzamemo npr. valj z največjim polmerom, izračunamo po podatkih $h = 10 \text{ cm}$, $R = 14 \text{ mm}$ in $s = 565 \text{ cm}$ iz Grafa 1 z enačbo (5) koeficient $c = 0,25 \text{ mm}$.

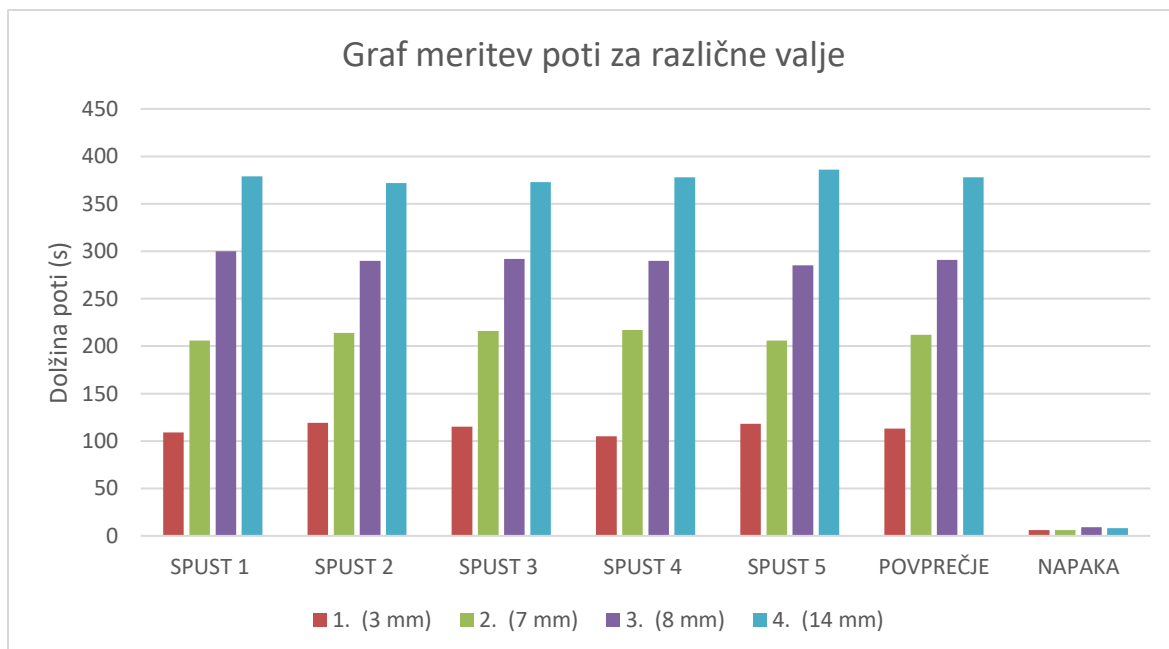
Ponovimo enačbo za izračun c :

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

Graf 1: Valji, $h = 10$ cm, različni polmeri



Graf 2: Valji, $h = 5$ cm, različni polmeri



Prikažimo še v številkah nekaj razmerij z uporabo že omenjene enačbe:

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

Enačba povezuje količini poti (s dolžine spusta) in polmera radija kotalečih teles (R).

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 $h = 10$ cm enako 1,21, pri spustu z višine 5 cm pa 1,30.

Količnik med polmeroma valjev št. 4 in 1 je enak 4,67, medtem ko je ustrezno razmerje povprečnih dolžin s pri spustu z višine $h = 10$ cm enako 3,87, pri spustu z višine 5 cm pa 3,35.

Najverjetnejši vzrok za odmike eksperimentalnih ugotovitev od teorije je rahel nagib tal, ki se mu ne moremo popolnoma izogniti. Vzrok pa je lahko tudi ne dovolj natančna meritev zunanje polmera valjev. Glede na podano napako za pot s v zadnjem stolpcu je namreč meritev poti dovolj natančna.

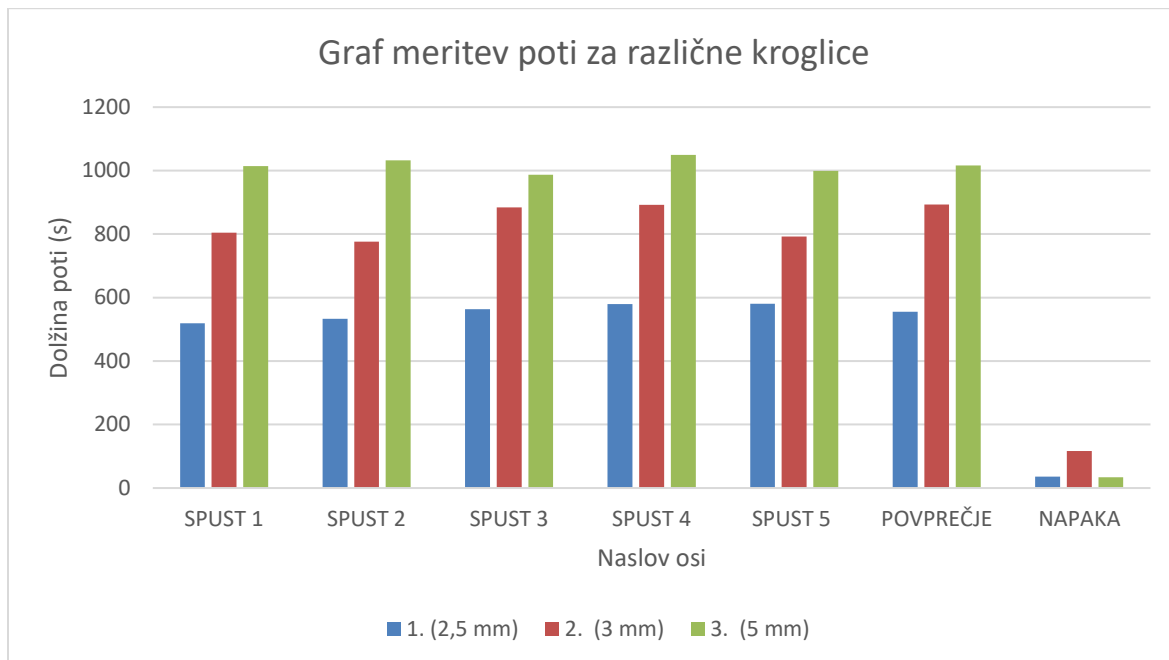


Slika 14: Timsko delo pri izvajanju poskusov

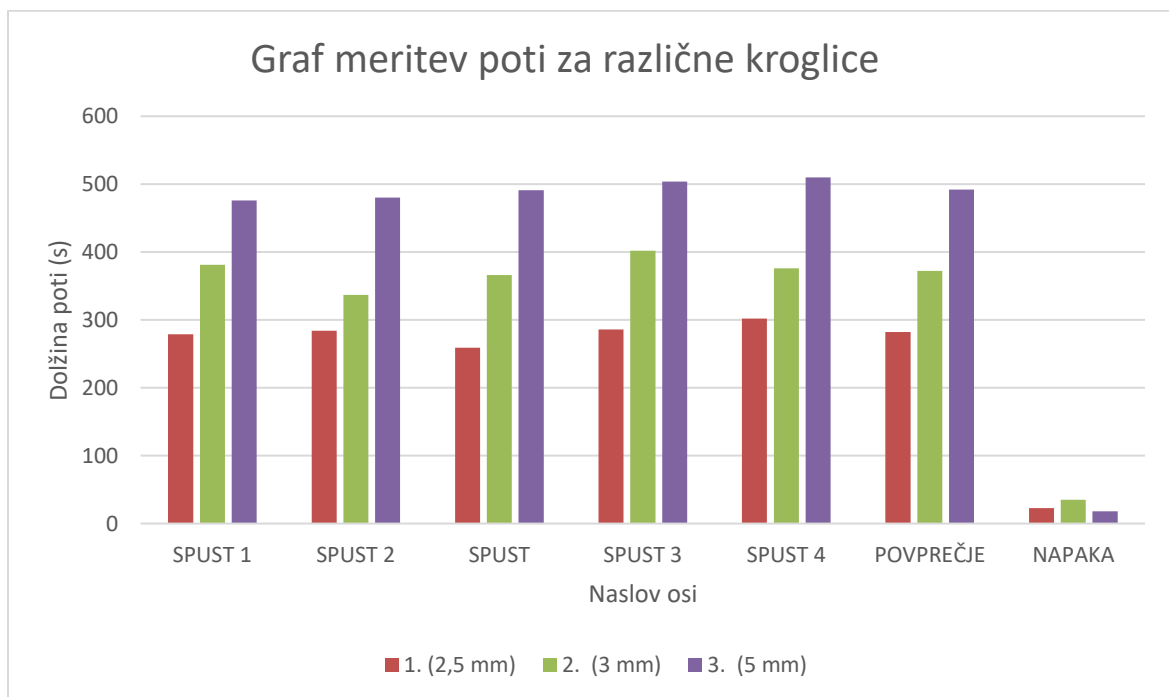
IZVEDBA POSKUSA 3

Valje smo nadomestili s kroglicami in naredili podobne poskuse.

Graf 3: Kroglice, $h = 10$ cm, različni polmeri



Graf 4: Kroglice, $h = 5$ cm, različni polmeri



Kvalitativni rezultati so pri kroglicah podobni kot pri valjih. Če pa primerjamo odvisnost poti s od začetne višine h , je premo sorazmerje bližje kot pri valjih. Razmerje obeh višin je 2, če pa primerjamo npr. povprečne poti največje kroglice, 1016 cm in 492 cm, dobimo količnik 2,07, kar je zelo blizu vrednosti 2.

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 spet 2. Opazimo, da večja kroglica res naredi približno dvakrat daljšo pot: pri $h = 10$ cm je količnik povprečnih poti enak 1,83, pri $h = 5$ cm pa 1,74. Če vzamemo npr. kroglico z največjim polmerom, izračunamo po podatkih $h = 10$ cm, $R = 5$ mm in $s = 1016$ cm iz Tabele 3 z enačbo (5) koeficient $c = 0,05$ mm, petkrat manj kot pri poskusih z valji. To pomeni, da je koeficient trenja in s tem sila trenja manjša pri večjih kotalnih elementih.

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

IZVEDBA POSKUSA 4

Znano je, da z mazanjem strojnih delov odpravimo trenje in s tem podaljšamo uporabnost. Istočasno tudi zaščitimo elemente pred korozijo. Masti in olja pomagajo odvajati toploto, ki nastane pri trenju elementov in zmanjšujejo hrup pri delovanju. Biti morajo visoke kvalitete in viskoznosti, primerna za visoke obremenitve in vibracije.

Kot smo že omenili s tem odpravimo tudi vibracije in zaščitimo ležaje pred nečistočami. Pozanimali smo se, da je vzdrževanje ležajev podobno, kot vzdrževanje vseh gibajočih strojnih delov (zobnikov, gredi, vrtilšč,...)

Mi smo za odpravo teh faktorjev želeli uporabiti:

- Namensko mazivo za vzdrževanje ležajev »Arcanol«
- Olivno olje

V tem delu poskusov smo želeli ugotoviti, kako vpliva mazanje na gibanje kroglice. Iz aluminijastega U profila smo izdelali izviren pripomoček (slika 15). Izrezali smo trikotni del ob strani na razdalji 10 cm od konca in zapognili navzgor. Zavedali smo se, da bomo potrebovali izredno majhen klanec, zato da nam bo kroglica ostala v žlebu.



Slika 15: Izrez na U profilu aluminija

Nekajkrat smo kroglico spustili, tako da smo našli idealen kot, ki nam bo omogočal iztek kroglice po žlebu. Odločili smo se, da bomo glede na ugotovitve prejšnjih poskusov uporabili dve dimenzijsko različni kroglici (premera 13 in 6 mm).

Namestili smo metrski trak in ga pritrdili z žebličkom (slika 16). Ugotovili smo, da je idealen kot za poskuse 4° .



Slika 16: Določitev kota – naklona

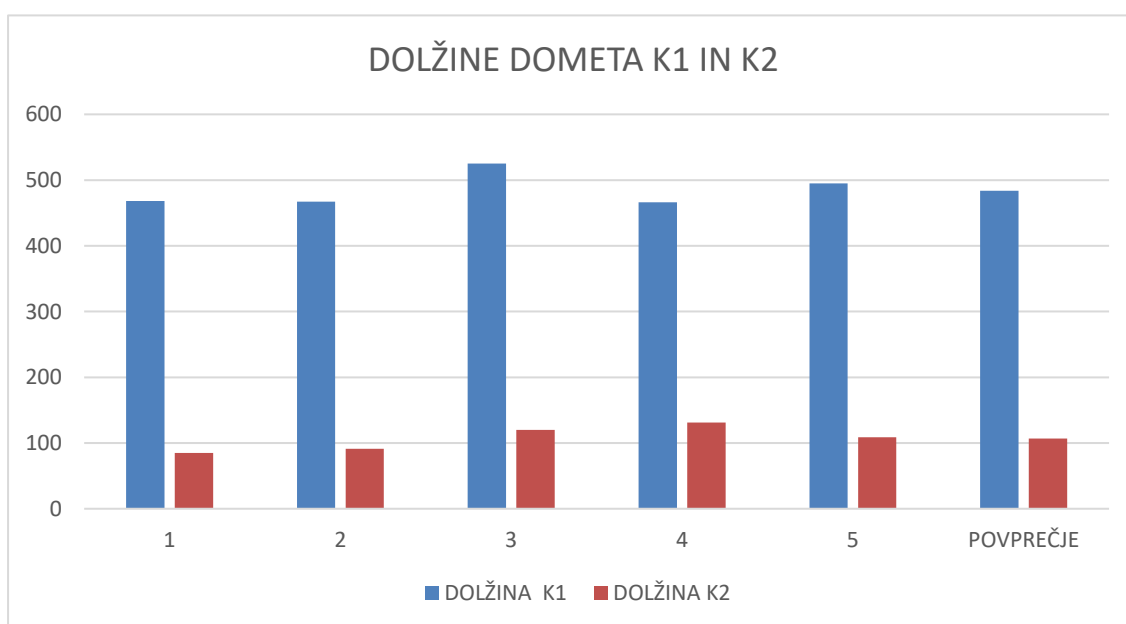
Poskusno smo nekajkrat spustili ležajno kroglico in začeli s testiranjem. Kot v prejšnji praksi smo tudi tokrat izvedli 5 poskusov in ugotovili povprečno vrednost, napako meritev.

NAČINI MAZANJA

Najprej smo se odločili za uporabo posebne masti (slika 17 levo), ki smo jo imeli v učilnici tehnike in rabi za vzdrževanju ležajev. Naleteli smo na težavo, saj se je kroglica dobesedno prilepila na žleb in pred njo se je po prisilnem gibanju nabral klin iz te masti. Takoj smo pomislili, da je to mazivo pregosto, zato smo se raje odločili za olivno olje. Tudi pri mazanju s tem medijem nismo dobili pričakovanih rezultatov, saj smo z oljem pretiravali. Ko smo z čopičem odstranili odvečno olje (slika 17 desno), pa smo dobili odlične rezultate, saj se je pot izteka bistveno povečala glede na poskuse pred mazanjem (sliki 18 in 19).

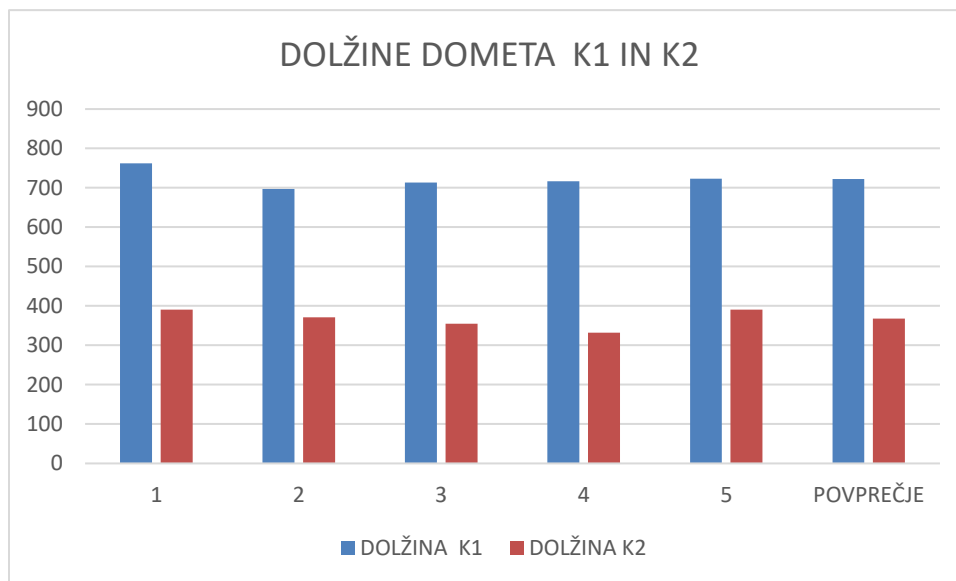


Slika 17: Mazanje žleba



Slika 18 (Graf 5): Dolžine poti za kroglico v žlebu: K1 je večji kotalni element, K2 pa manjši. Dolžine so podane v mm.

Po mazanju so se poti kotaljenja kroglice bistveno podaljšale.



Slika 19 (Graf 1): Dolžine poti za kroglico v žlebu po mazanju: K1 je večji kotalni element, K2 pa manjši. Dolžine so podane v mm.

Če primerjamo povprečne vrednosti, ugotovimo, da se je pot podaljšala za primer večje kroglice za 70 %, za primer manjše kroglice pa celo 3,5–krat.

4 SKLEP

Ugotovili smo, da se sila kotalnega trenja za valje in kroglice zmanjšuje z naraščajočim polmerom. Torej večji kot so kotalni elementi, manjša je sila trenja. To potrjuje prvo raziskovalno hipotezo. 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 ustrezeni koeficient c , ki ima v skladu z enačbo (5) dolžinske dimenzije: 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 napaka meritve, predvsem polmerov, nagib tal in nesimetrično gibanje pri valjih. Dokazali smo tudi, da ustrezno mazanje kotalnih elementov zmanjša kotalno trenje, kar je v skladu z drugo hipotezo. Priporočamo torej, da se za manjše izgube pri gibanju zaradi trenja pri prevoznih sredstvih uporabljajo ležaji s čim večjimi kotalnimi elementi in da je potrebno vzdrževanje z mazanjem za optimalno delovanje vrtečih se delov.

Poudarimo še, da čeprav bi lahko izmerili tudi mase kotalečih teles, tega podatka pri naši raziskavi nismo potrebovali. Ključni podatki so: polmer telesa (v našem primeru valjčka ali kroglice), začetna višina na klancu in pot ustavljanja na vodoravni podlagi.

VIRI

Spletni viri:

- 1 <http://visjasolaravne.si/files/2018/11/LE%C5%BDAJI.pdf>
- 2 <https://guide.directindustry.com/it/guida-allacquisto-di-un-cuscinetto/>
- 3 https://studentski.net/gradivo/vis_scv_meh_ost_sno_lezaji_01
- 4 <https://www.michelin.si/auto/nasveti/osnove-pnevmatik/kotalni-upor>

Slikovni viri:

- (1) Slike: arhiv mentorice Mojce Milone
- (2) Viri, naštet pri podnapisih slik