

MEHANIKA GIBANJA VOZILA

Interna skripta

Pripravila: Mateja Vlašić

Ljubljana, november 2024

Vsebina

OPIS MODULA	1
1. Osnove fizike in mehanike.....	2
1.1. Merske enote po mednarodnem sistemu SI	2
1.2. Isaac Newton	3
1.3. Gibanje vozila: hitrost in pospešek.....	5
Ponavljjanje	6
Računske naloge.....	6
2. Zmožljivost motorja	7
3. Pot ustavljanja in zavorna pot	8
Ponavljjanje	9
Računske naloge.....	9
4. Vožnja v ovinku.....	10
Ponavljjanje	11
Računske naloge.....	11
5. Prevrnitev vozila	12
Prevrnitev vozila v ovinku.....	12
Prevrnitev viličarja	13
Prevrnitev viličarja – stabilnost viličarja	13
Ponavljjanje	14
Računske naloge.....	14
6. Upori vožnje	15
Ponavljjanje	18
Računske naloge.....	18
7. Kotne funkcije.....	19
Viri in bibliografija	20

OPIS MODULA

Predmet *Mehanika gibanja vozila* dijakom nudi temeljna znanja o zakonih fizike, ki vplivajo na gibanje vozil. V uvodnih temah se dijaki spoznajo z osnovami fizike, vključno z osnovnimi merskimi enotami, Newtonovimi zakoni gibanja ter temeljnimi pojmi, kot so enakomerno in pospešeno gibanje. Nadalje predmet obravnava različne vozne upore, kot so upor zraka, upor pri kotaljenju in upor pospeševanja, kar dijakom omogoča razumevanje dejavnikov, ki vplivajo na vlečno silo, porabo goriva ter pot ustavljanja vozila.

V okviru dinamičnih analiz predmet vključuje preučevanje vožnje skozi ovinek, kjer dijaki spoznavajo delovanje centripetalnih in centrifugalnih sil ter pogoje za zdrs in prevrnitev vozila. Z obravnavo stabilnosti in upravljanja vozila v različnih pogojih predmet nudi celovito razumevanje vozniških izzivov in varnosti. Dijaki pridobivajo praktična znanja o izračunih povezanih z vožnjo skozi ovinek, kjer se osredotočajo na stabilnostne momente in momente zdrsa, ter razvijajo kompetence za izračunavanje zavorne poti.

Dodatno dijaki raziskujejo osnovne pojme navor in moč, ki sta pomembna za opisovanje in oceno voznih zmogljivosti. Učne metode vključujejo frontalno delo, individualno učenje ter skupinske naloge, ki študente spodbujajo k samostojni analizi. Predmet vključuje tudi praktične vaje, kjer dijaki izvajajo naloge in rešujejo računske probleme, povezane z voznimi upori in prenosom moči.

1. Osnove fizike in mehanike

Mehanika je veda o gibanju in mirovanju teles ter o silah, ki to povzročajo. Izhaja iz grške besede *mehano*, kar pomeni stroj, orodje.

1.1. Merske enote po mednarodnem sistemu SI

Starodavno merjenje dolžine je temeljilo na človeškem telesu, na primer dolžina stopala (čevelj), dolžina koraka, razpon dlani in širina palca.

Da je uporaba enotnih in primerljivih merskih enot bistvena za nemoteno trgovino in razvoj družbe tako na državni kot mednarodni ravni, so leta **1875** spoznali **voditelji 17 držav, ki so podpisali Metrsko konvencijo**. H konvenciji je do danes pristopila večina razvitih držav, tudi Slovenija (Avstro-Ogrsko cesarstvo). V okviru Metrške konvencije je bil opredeljen **mednarodni sistem enot SI**, ki določa sedem osnovnih enot.

Osnovne enote predstavlja izbor sedmih dobro definiranih enot: **meter (m)**, **kilogram (kg)**, **sekunda (s)**, **amper (A)**, **kelvin (K)**, **mol (mol)** in **kandela (cd)**.

S kombiniranjem 7 osnovnih enot tvorijo se izpeljane enote.

Ime fizikalne količine	Simbol količine	Ime osnovne enote	Simbol osnovne note
dolžina	l	meter	m
masa	m	kilogram	kg
čas	t	sekunda	s
električni tok	I	amper	A
temperatura	T	kelvin	K
svetilnost	I_v	kandela	cd
množina (snovi)	n	mol	mol

Desetiške predpone

Mednarodni sistem enot določa uporabo **predpon (desetiških mnogokratnikov)**. Predpone so oznake, s katerimi nadomestimo velika ali majhna števila, ki imajo vrednost desetiških mnogokratnikov.

Desetiške predpone:

Ime	Znak	Potenca	Kako se pretvarjajo merske enote?
tera	T	10^{12}	
giga	G	10^9	
mega	M	10^6	
kilo	k	10^3	
hekto	h	10^2	
deka	da	10^1	
Brez predpone	1	10^0	
deci	d	10^{-1}	
centi	c	10^{-2}	
mili	m	10^{-3}	
mikro	μ	10^{-6}	
nano	n	10^{-9}	
piko	p	10^{-12}	

1.2. Isaac Newton

Isaac Newton je bil angleški matematik, fizik, astronom in filozof, ki velja za enega najvplivnejših znanstvenikov v zgodovini. Rojen je bil leta 1643 v Angliji in je znan predvsem po svojem delu na področju fizike, kjer je **oblikoval tri osnovne zakone gibanja, znane kot Newtonovi zakoni**. Njegovo delo *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (1687) je temelj znanstvene revolucije 17. stoletja in je ključno prispevalo k razvoju klasične mehanike. Newton je razvil tudi **gravitacijski zakon**, ki pojasnjuje privlačnost med telesi na podlagi njihove mase in oddaljenosti. S svojim delom je postavil temelje moderne znanosti in eksperimentalnega pristopa, ki se še danes uporablja v raziskavah. Newtonova dela so postavila temelje za številne tehnološke dosežke v 19. in 20. stoletju ter omogočila razumevanje vesolja na povsem novi ravni. (Hall, 1992)

Trije Newtonovi zakoni gibanja

Prvi zakon (Zakon inercije): Newtonov prvi zakon pravi, da telo ostane v stanju mirovanja ali enakomerne gibanja, dokler nanj ne deluje zunanja sila. To pomeni, da telo ne spremeni svoje hitrosti ali smeri brez vpliva sile.

Primer: Avto, ki miruje, bo v mirovanju ostal, dokler nanj ne začnemo delovati z zunanjo silo (npr. ga potisnemo). Podobno se avto v gibanju ne bo ustavil, dokler nanj ne delujejo sile, kot so zavorna sila ali zračni upor.

Drugi zakon (Zakon pospeška): Drugi Newtonov zakon določa, da je pospešek telesa sorazmeren z vsoto sil, ki delujejo nanj, in obratno sorazmeren z njegovo maso. Torej: večja masa telesa – več sile potrebujemo, da bi telesu spremenili obliko gibanja (hitrost, smer).

Matematika zakona je podana kot: $F = m \cdot a$

kjer:

F je sila, ki deluje na telo [N],

m je masa telesa [kg],

a je pospešek, ki ga doseže telo [m/s^2].

Primer: Če s silo potisnemo nakupovalni voziček, začne ta pospeševati. Večja masa vozička zahteva večjo silo za enak pospešek.

Tretji zakon (Zakon akcije in reakcije): Tretji Newtonov zakon pravi, da na vsako akcijo obstaja enaka in nasprotna reakcija. Ko telo A deluje na telo B z neko silo, telo B deluje na telo A z enako, vendar nasprotno usmerjeno silo. (Halliday, Resnick, & Walker, 2018)

Primer: Ko oseba skoči s čolna, potisne čoln nazaj (reakcija), kar povzroči gibanje čolna v nasprotno smer od skoka.

Splošni gravitacijski zakon

Splošni gravitacijski zakon poenostavljeno določa, da se vse mase med seboj privlačijo z gravitacijsko silo, ki je odvisna od njihove mase in razdalje med njima. Moč gravitacijske sile je večja, če sta telesi bolj masivni in če sta bližje druga drugi.

Teža in masa nista enaki količini in ju ne smemo mešati ali zamenjevati. **Teža** je **sila** in jo merimo v **newtonih [N]**, masa pa je **množina snovi**, ki jo merimo v **kilogramih [kg]**.

Teža je vektorska količina in kaže v smeri proti središču Zemlje, kar na Zemljinem površju pomeni navpično navzdol. Zaradi teže vsi predmeti, ki jih vržemo prej kot slej padejo na Zemljo. **TEŽA je gravitacijska sila Zemlje na telesa v njeni okolici. Spreminja se z oddaljenostjo od Zemlje. Bolj kot se od Zemlje oziroma njenega središča oddaljujemo, manjša je teža telesa.**¹

Matematika zakona je podana kot: $F_g = m \cdot g$

F_g je sila teža [N],

m je masa telesa [kg],

g je gravitacijski pospešek $g = 9,81$ [m/s^2].

Padanje predmetov na Zemljo: Gravitacija vleče vse predmete proti središču Zemlje, zaradi česar predmeti padajo na tla, ko jih spustimo.

Luna kroži okoli Zemlje: Zemljina gravitacija zadržuje Luno v njeni orbiti, kar povzroča plimovanje oceanov na Zemlji.

Primer: Če je masa telesa 60 kilogramov, gravitacijska sila (sila teža) tega telesa je:

$$F_g = m \cdot g = 60 \cdot 10 = 600 \text{ [N]}$$

¹ Dodatne razlage in gradivo: www.gravitacija.net.

1.3. Gibanje vozila: hitrost in pospešek

Premo gibanje je najpreprostejše gibanje, pri katerem se togo telo giblje po premici.

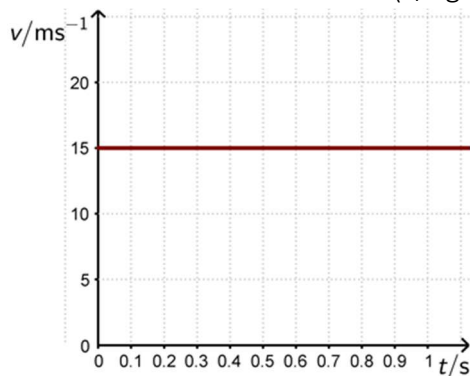
Vrste gibanja vozila

A) Glede na tir (premico), ki ga telo opiše pri gibanju, delimo gibanje na: **premo in krivo**.
Vožnja avtomobila po ravni cesti in gibanje vlaka po ravnih tračnicah je premo gibanje.
Ko avtomobil / vlak zavije v ovinek, gibanje ni več premo.

B) Gibanje razdelimo glede na **hitrost** na:

1. Enakomerno gibanje - hitrost telesa **se s časom ne spreminja**: ni ne pospeška ne pojemka (npr. tempomat). Če se hitrost telesa med gibanjem ne spreminja (hitrost je konstantna, neodvisna od časa), telo prepelje v enakih časovnih intervalih enako dolge poti.

Graf odvisnosti hitrosti od časa (v/t graf) za tako gibanje je **vodoravna ravna črta**.



Pot s , ki jo opravi telo pri takšnem gibanju, enaka je produktu hitrosti v in časa t .

$$s = v \cdot t$$

Hitrost vozila je 10 m/s. Kolikšno pot prepelje vozilo v eni minuti?

$$s = 10 \cdot 60 = 600 \text{ m}$$

2. Neenakomerno gibanje

V splošnem hitrost gibanja ni stalna, ampak se spreminja s časom – **gibanje je neenakomerno**.

Če se mu hitrost **veča**, govorimo o **pospešku**, če pa se mu **manjša**, je pospešek negativen in mu pravimo **pojemek**.



Pospešek (a) je količina, ki nam pove, za koliko se je telesu spremenila hitrost (Δv) v določenem času (Δt). Pospešek definiramo kot kvocient med spremembo trenutne hitrosti in časa, v katerem pride do spremembe. Enota za pospešek je m/s^2 .

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

Pr. Za koliko se spremeni hitrost vozila, ki 20 sekund pospešuje s konstantnim pospeškom $0,5 \text{ m/s}^2$? Začetna hitrost vozila je 60 km/h . $\Delta v = a \cdot t = 0,5 \cdot 20 = 10 \text{ m/s}$

Hitrost vozila po 20 sekundah: $v = (60 : 3,6) + 10 = 16,67 + 10 = 26,67 \text{ m/s}$

Ponavljjanje

1. Definirajte izraz mehanika.
2. Kaj je metrska konvencija spremenila v zgodovini merjenja.
3. Naštejte osnovne merske enote ustvarjene s mednarodnim sistemom SI.
4. Kaj so predpone in zakaj se uporabljajo?
5. Naštejte predpone.
6. Kdo je bil Isaac Newton? Kateri so njegovi najpomembnejši dosežki?
7. Definirajte Newtonove zakone in pojasnite na primerih.
8. Definirajte splošni gravitacijski zakon.
9. Opišite vrste gibanja glede na hitrost.
10. Definirajte pospešek in njegovo mersko enoto.

Računske naloge

1. Pešec se giblje s hitrostjo 16 km/h, kolesar pa s hitrostjo 4,5 m/s. Kateri je hitrejši?
2. Avto vozi s hitrostjo 120 km/h po ravni cesti, 30 min.
 - a) Kolikšna je hitrost, ko preračunamo v m/s?
 - b) Koliko avto prevozi po 10, 20 in 30 min?
 - c) Narišite grafa, ki kažeta odvisnost hitrost od časa in poti od časa.
3. Telo se giblje s hitrostjo 25 m/s.
 - a) Kolikšno razdaljo prepelje v 10 s?
 - b) Kolikšno razdaljo prepelje v 20 s?
 - c) Kolikšno razdaljo prepelje v 30 s?
 - d) Narišite v/t diagram: odvisnosti hitrosti od časa.
4. Voznik vozi avto enakomerno, ko v nekem trenutku začne pospeševati. Vsakih 10 s se mu hitrost poveča za 2 m/s. Po 60s doseže hitrost 108 km/h.
 - a) Kolikšna je bila njegova začetna hitrost?
 - b) Izračunajte pospešek.
 - c) Narišite v/t, s/t in a/t grafe.
 - d) Kako bi narisali a/t graf, če bi vozilo pojemalo?
5. Avtomobil začne pospeševati iz stanja mirovanja s konstantnim pospeškom $0,5 \text{ m/s}^2$
 - a) Izračunajte hitrost avtomobila vsakih 20 sekund (1 minuto).
 - b) Izračunajte kolikšno pot prevozi avto po eni minuti.
 - c) Narišite v/t, s/t in a/t grafe.

2. Zmogljivost motorja

Fizikalni veličini, ki določata zmogljivost motorja vozila sta moč in navor.

1. **Moč motorja** je merilo za energijo, ki jo motor lahko proizvede v določenem času, običajno izražena v **kilovatih (kW)** ali konjskih močeh (KM).

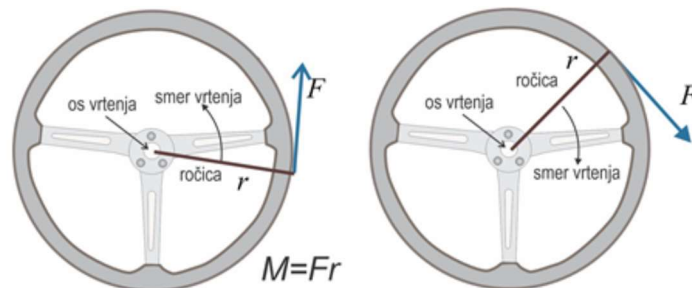
Ta moč določa, kako hitro lahko vozilo doseže določeno hitrost in kakšno obremenitev lahko prenaša brez zmanjšanja zmogljivosti. Stara enota za moč je konjska moč (KM) in meri približno 746 vatov.

Večja moč motorja običajno pomeni hitrejšo pospeševanje, kar je pomembno pri prehitevanju. Pri močnih motorjih je lahko poraba goriva večja, zato se voznikom pogosto priporoča premislek o svojih potrebah in navadah glede na stroške goriva in ekološki vpliv (diesel, bencin).

2. **Navor ali moment** je fizikalna količina oziroma sila, ki povzroči kroženje, če je za neko razdaljo odmaknjena od osi krožišča. Enaka je produktu sile in razdalje premice sile od osi.

Formula:

$$M = F \cdot r$$



Navor motorja je merilo vrtilne sile, ki jo motor prenese na kolesa, kar omogoča premikanje vozila. Izražen je v **njuton metrih (Nm)** in določa, kako močno vozilo lahko pospešuje, še posebej pri nizkih hitrostih. Višji kot je navor, tem učinkovitejši je motor pri določenih obratih.

Navor je ključen za pospešek pri nižjih hitrostih, ko je potrebna večja vlečna moč. Večji navor omogoča lažje premikanje težkih vozil ali vleko prikolic, zato je pomemben pri vozilih, namenjenih vleki ali prevozu tovora. Večji navor pri nižjih vrtljajih omogoča bolj ekonomično vožnjo, saj lahko vozilo hitreje pospeši brez visokih obratov, kar zmanjša porabo goriva pri mestni vožnji.

Primerjava moči in navora med dizelskimi, bencinskimi in električnimi motorji: Dizelski motorji so optimalni za ekonomično vleko in daljše vožnje zaradi višjega navora pri nizkih obratih. Bencinski motorji zagotavljajo višjo končno moč pri višjih obratih in so zato primerni za športne in osebne avtomobile, kjer je pomembno hitro pospeševanje. Električni motorji, z največjim navorom takoj ob zagonu, zagotavljajo najvišjo odzivnost in učinkovitost, kar jih naredi privlačne za različne vrste osebnih in komercialnih vozil, še posebej v mestnih okoljih.

Vprašanja za ponavljanje:

1. Opišite moč motorja, mersko enoto in povezavo s konjsko močjo.
2. Opišite navor ter pojasnite pri katerih vrstah motorja je ključen?
3. Primerjajte moč in navor pri različnih vrstah motorja.

3. Pot ustavljanja in zavorna pot

Pot ustavljanja (L_u) je razdalja, ki jo vozilo prevozi od trenutka, ko voznik zazna potrebo po ustavitvi, do trenutka, ko se vozilo ustavi in vključuje: **pot reakcije** in **zavorno pot**. Formula:

$$L_U = L_R + L_Z (m)$$

Pot ustavljanja vozila (L_U) je odvisna od:

- **reakcijskega časa voznika** t_R (od trenutka, ko voznik opazi potrebo po zaviranju, do trenutka, ko aktivira zavoro). Ta čas je lahko od 0,3 s do 2 s odvisno od sposobnosti in zbranosti voznika,
- **hitrosti** v vozila,
- **tornega koeficienta** f_T **med kolesi in podlago** (največji na betonski podlagi, grobem asfaltu, slabši na gladkem asfaltu, zelo se zmanjša v primeru mokrega cestišča še bolj v primeru poledice). Torni koeficient pri mirovanju je večji kot pri gibanju. Ko vozilo zdrsne se s tem torni koeficient zmanjša, oprijem s podlago je težko ponovno vzpostaviti.

1. **Pot reakcije voznika:** razdalja, ki jo vozilo prevozi od trenutka, ko voznik vidi oviro, do trenutka, ko se z nogo nasloni na zavorni pedal.

$$L_R = v \cdot t_R (m)$$

Dolžina reakcijske poti je odvisna od: voznikovega **reakcijskega časa** t_R in **hitrosti** vozila v .

Povprečni reakcijski čas voznika je od 0,8 do 1,2 sekunde; če je voznik pod vplivom alkohola ali zelo utrujen, se reakcijski čas podaljša na 1,5 do 2 sekunde.

Hitrost vozila se v reakcijskem času še ne zmanjšuje. Zmanjševati se začne, ko začnemo zavirati.

2. **Zavorna pot:** pot, ki jo vozilo prevozi od začetka zaviranja do popolne ustavitve.

$$L_Z = \frac{v^2}{2 \cdot a} (m)$$

- Na zavorno pot vplivajo: hitrost vožnje vozila (pri večjih hitrostih je daljša), vremenske razmere (mokro cestišče, poledica – pot zaviranja se dvakrat oz. trikrat podaljša), stanje pnevmatike (izrabljene(stare) pnevmatike, ne dajejo več dobrega oprijema), stanje cestišča (izrabljena površina cestišča), kvaliteta in brezhibnost zavornih sistemov v vozilu.

Pojemek a pri zavorni poti je odvisen od tornega koeficienta f_T , ki pa je odvisen od stanja

$$a = f_T \cdot g (m/s^2)$$

podlage:

Stanje cestišča:	Suho	Mokro	Poledenelo
f_T	0,8	0,4	0,2

Ponavljjanje

1. Kaj je pot ustavljanja in od katerih potih je sestavljena?
2. Od česa je odvisna pot ustavljanja?
3. Kaj je pot reakcije voznika in od česa je odvisna? Koliko znaša?
4. Kateri elementi vplivajo na zavorno pot vozila?
5. Od česa je odvisen pojemek pri zavorni poti in koliko znaša?

Računske naloge

1. Izračunajte, ali se bo voznik, ki pri hitrosti 54 km/h opazi otroka na cesti na razdalji 125 m, pravočasno ustavil. Reakcijski čas je 1 s. Zavira s pojemkom 1 m/s^2 .
2. Izračunajte pot ustavljanja pri suhem cestišču. Čas reagiranja je 0,7s.

HITROST	Hitrost [m/s]	L_R	L_Z	L_U
50 km/h				
90 km/h				
130 km/h				

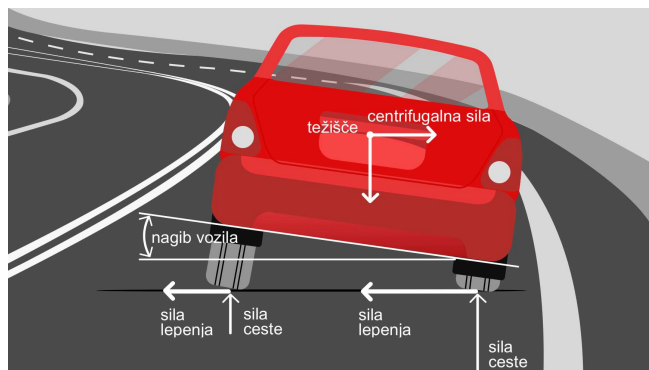
3. Izračunajte pot ustavljanja pri mokrem cestišču. Čas reagiranja je 0,7s.

HITROST	Hitrost [m/s]	L_R	L_Z	L_U
50 km/h				
90 km/h				
130 km/h				

4. Vozilo se giblje s hitrostjo 95 km/h, koeficient trenja med kolesi in cesto je 0,7. Voznikov reakcijski čas je 0,7 s. Izračunajte reakcijsko pot, pot zaviranja in celotno pot ustavljanja. Kakšen je pojemek pri zaviranju?
5. Vozilo se giblje s hitrostjo 126 km/h, koeficient trenja med kolesi in cesto je 0,65. Voznikov reakcijski čas je 0,5 s.
 - a) Izračunajte reakcijsko pot, pot zaviranja in celotno pot ustavljanja.
 - b) Izračunajte pojemek pri zaviranju?
 - c) S kolikšno hitrostjo bi lahko vozilo peljalo po zaledeneli cesti pri tornem koeficientu 0,25 da bo pot zaviranja enaka kot pri zaviranju v nalogi a?

4. Vožnja v ovinku

Ko vozilo prehaja skozi ovinek, na njega delujejo različne sile, ki vplivajo na njegovo gibanje. Te sile so ključne za razumevanje, zakaj vozilo ohranja stabilnost ali se lahko prevrne ali izgubi oprijem. Pri prehitri vožnji skozi ovinek lahko pride do **zdrsa** ali **prevrnitve** vozila.



Glavne sile, ki delujejo na vozilo v ovinku, so:

1. Centripetalna sila

Centripetalna sila je sila, ki usmerja vozilo proti središču krožnice, po kateri se giblje. Ta sila je potrebna, da vozilo ohrani krožno gibanje. Velikost centripetalne sile je odvisna od **hitrosti** vozila v in **radija** ovinka r ter **mase** vozila m :

$$F_c = \frac{m \cdot v^2}{r} (N)$$

2. Trenje

Trenje F_T med pnevmatikami vozila in cestiščem zagotavlja, da vozilo ne drsi iz ovinka. To trenje omogoča, da se centripetalna sila prenaša na vozilo. Količina trenja je odvisna od **koeficienta trenja** f_T med pnevmatikami in cestiščem, ki se lahko spreminja glede na površinske pogoje (suha ali mokra cesta, snežni sloj ipd.).

$$F_T = F_g \cdot f_T (N)$$

3. Teža vozila

Teža vozila F_g je posledica gravitacije in deluje vertikalno navzdol. V ovinku teža vozila vpliva na to, kako se prenaša obremenitev na pnevmatike, saj se lahko zaradi nagiba vozila v ovinku del teže preusmeri na zunanjo stran ovinka. To pomeni, da bo zunanji pnevmatiki vozila naložena večja obremenitev kot notranji.

$$F_g = m \cdot g$$

4. Sila odklona (Centrifugalna sila)

Medtem ko centripetalna sila usmerja vozilo proti središču kroga, v ovinku deluje centrifugalna sila, **ki vozilo med zavijanjem vleče iz ovinka**. To ni prava sila, ampak iluzija, ki nastane zaradi inercije vozila in želje, da ohrani svojo linearno pot. (Joupert & Harris, 2018)

$$F_c = \frac{m \cdot v^2}{r} (N)$$

Nagnjenost vozila

Če vozilo vozi po zelo ostrih ovinkih, se voznik lahko odloči, da rahlo nagne vozilo v ovinku, da zmanjša učinek gravitacije in poveča stabilnost ter zmanjša tveganje za prevračanje. Delovanje centrifugalne sile v ovinku se bistveno zmanjša s prečnim nagibom vozišča proti središču polmera ovinka (na notranjo stran ovinka). Nagib vozišča je odvisen od polmera ovinka in predvidene hitrosti vožnje. Manjši kot je polmer, večji bo nagib ceste proti središču polmera.



Povzetek

Ko vozilo prehaja skozi ovinek, so centripetalna sila, trenje, teža in inercija ključni dejavniki, ki vplivajo na njegovo gibanje. Vozilo mora ohraniti ravnovesje med temi silami, da prepreči izgubo oprijema ali prevrnitev. Da vozilo ostane na cesti mora biti centrifugalna sila vedno manjša od sile trenja.

Mejni pogoj zdrsa, iz katerega lahko izračunamo največjo hitrost vožnje, da ne pride do zdrsa:

$$v_{\max} = \sqrt{r \cdot g \cdot f_T}$$

Ponavljjanje

1. Katere sile delujejo na vozilo v ovinku?
2. Kaj je centripetalna sila in po čem se razlikuje od centrifugalne sile?
3. Od česa je odvisna centrifugalna sila?
4. Kako se v ovinku zmanjša delovanje centrifugalne sile?
5. Od česa je odvisna največja hitrost, da ne pride do zdrsa vozila?

Računske naloge

1. Vozilo z maso 1 315 kg, vozi skozi krivino polmera 41 m s hitrostjo 72 km/h. Ali bo vozilo zdrsnilo na mokri cesti, pri tornem koeficientu $f_t = 0,46$ (izračunajte F_t in F_c)?
2. Izračunajte največjo hitrost vožnje skozi to krivino ob pogojih navedenih v zgornji nalogi.
3. Kateri znak za omejitev hitrosti je treba postaviti na cestišče v krivini da preprečimo zdrs vozila v prvi nalogi?
4. Vozilo s težo 14.715 N zavije v polmera 125 m, s hitrostjo 52 km/h. Ali bo vozilo zdrsnilo na suhi cesti, pri tornem koeficientu $f_T = 0,8$?
5. Izračunajte največjo hitrost vožnje v zgornji nalogi.

5. Prevrnitev vozila

Prevrnitev vozila v ovinku

Prevrnitev vozila v ovinku je posledica neravnotežja med različnimi silami, ki delujejo na vozilo med prehajanjem ovinka. Glavni dejavnik, ki vpliva na tveganje prevrnitve, je **presežek centrifugalne sile**, ki jo vozilo ni sposobno nadomestiti z ustreznim oprijemom ali stabilnostjo.

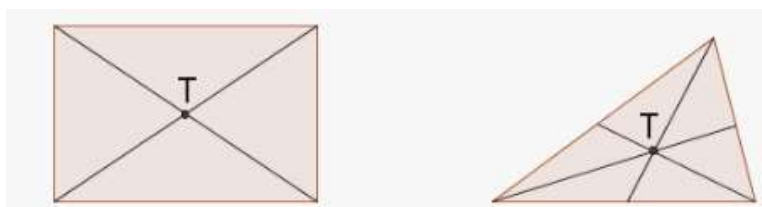
Ključni razlogi, zakaj lahko do prevrnitve pride:

- Prekomerna hitrost v ovinku: centripetalna sila, ki je potrebna za krožno gibanje postane večja od tiste, ki jo lahko zagotovi trenje med pnevmatikami in cestiščem. Posledično se vozilo začne drseti, kar povečuje tveganje za izgubo oprijema in prevrnitev, še posebej, če je ovinek oster.
- Nizek koeficient trenja: na mokrih, snežnih ali ledenih površinah se zmanjša sposobnost vozila, da prenese centripetalno silo. To lahko povzroči, da pnevmatike izgubijo oprijem, kar vodi v drsenje ali prevrnitev.
- Visok center mase vozila: Če vozilo nima nizkega težišča (npr. SUV-ji ali tovornjaki), je večja verjetnost, da bo do prevrnitve prišlo.
- Preobremenitev vozila
- Zračni upor in stranski učinki: pri zelo visokih hitrostih v ovinku lahko zračni upor in drugi aerodinamični učinki prav tako prispevajo k destabilizaciji vozila.
- Nepravilna vožnja v ovinku: Če voznik nepravilno obvladuje vozilo v ovinku, na primer, če nenadoma zavira ali pospešuje, lahko pride do nenadnih sprememb v dinamiki vozila. To lahko povzroči zdrs ali nenadzorovan premik vozila, kar povečuje tveganje za prevrnitev.

Včasih lahko več dejavnikov, kot so prehitro vožnja, mokra cesta in visok center mase vozila, skupaj povzročijo prevrnitev. Na primer, če vozilo vozi prehitro na mokri cesti s previsokim centrom mase, lahko že manjša napaka v manevriranju pripelje do prevrnitve. (Joupert & Harris, 2018)

Težišče določenega telesa (*tovora*) je povprečje razporeditve mase znotraj homogenega telesa oziroma navidezna točka, v kateri je skoncentrirana celotna masa telesa, tj. **točka, v kateri "prijemlje" teža**.

V primeru kocke ali kvadra točko težišča dobimo z presekom telesnih diagonal.



V primerih, ko masa ni razporejena enakomerno po telesu – nehomogeno telo, je **točka težišča pomaknjena bližje strani, na kateri je predmet težji**, npr. tovorno vozilo.

Prevrnitev viličarja

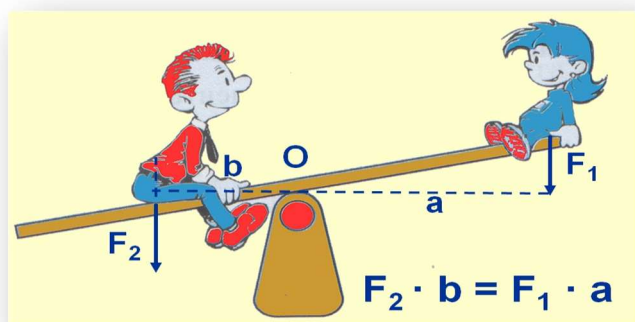
Prevrnitev viličarja je lahko zelo nevarna nesreča, ki se običajno zgodi zaradi napačne uporabe, preobremenitve ali nepravilnega ravnanja z vozilom.

- **Preobremenitev:** Vsak viličar ima določeno maksimalno nosilnost.
- **Nepravilna uporaba:** Hitro zavijanje, nenadno pospeševanje ali vožnja po neravnih tleh.
- **Visoko težišče:** Viličarji, ki prevažajo težke ali visoke tovore, imajo visok center mase.

Prevrnitev viličarja je pogosto povezana z **delovanjem momenta**, saj prekomerno nalaganje ali napačna uporaba vozila vpliva na ravnotežje in stabilnost. **Moment, ki deluje na vozilo, je produkt sile in razdalje od osi vrtenja** (t.j. razdalje od točke, okoli katere se lahko vozilo prevrne). (Dempsey, 2014)

Navor ali moment M je fizikalna količina oziroma sila, ki povzroči kroženje, če je za neko razdaljo r odmaknjena od osi krožišča. Enaka je produktu sile teže F_g in razdalje premice sile r od osi.

- Formula: $M = F_g \cdot r \text{ [Nm]}$



Prevrnitev viličarja – stabilnost viličarja

Statična stabilnost je odpor telesa proti momentu prevrnitve. Vozilo je stabilno, če je stabilnostni moment (M_s) večji od prevrnitvenega momenta (M_p).

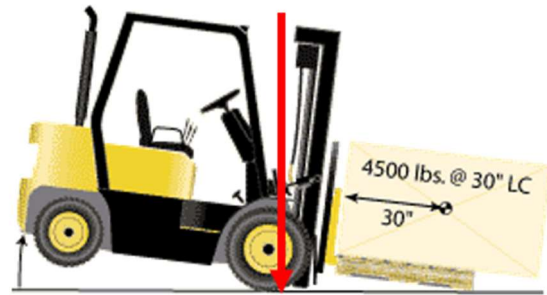
$$M_s \geq M_p$$

M_p - Prevrnitveni moment je vsota vseh momentov, ki prevračajo vozilo okoli prevrnitvene točke -pnevmatika okoli katere se lahko vozilo prevrne.

M_s - Stabilnostni moment je vsota vseh momentov, ki vozilu preprečujejo prevrnitev.

Ključni element, ki zagotavlja stabilnost viličarja, je **protiutež**. Protiutež se običajno nahaja v zadnjem delu viličarja in je zasnovana tako, da uravnava težišče vozila, še posebej pri dvigovanju težkega tovora spredaj.

Kje je točka vrtilišča?



Prednja pnevmatika je točka okoli katere se viličar lahko prevrne.

Koliko je viličar stabilen, nam pove koeficient stabilnosti: razmerje med momentom stabilnosti (M_s) in momentom prevrnitve (M_p):

$$v = \frac{M_s}{M_p}$$

Če je vrednost koeficienta **večja od 1**, je objekt **STATIČNO STABILEN** - ne pride do prevrnitve!

V praksi je v-koeficient stabilnosti varnost, ko znaša od 1,25 do 2. Večji kot je, večja je varnost.

Ponavljanje

1. Naštejte ključni razloge, zakaj lahko pride do prevrnitve avtomobila v ovinku?
2. Katere so napake, ki najpogosteje povzročajo prevrnitev viličarja? Pojasnite jih.
3. Definirajte statično stabilnost ter pojasnite kdaj je viličar stabilen?
4. Kateri element na viličarju zagotavlja stabilnost?
5. Pojasnite koeficient stabilnosti. Kdaj koeficient stabilnost zagotavlja varnost?

Računske naloge



1. Izračunajte moment stabilnosti viličarja na sliki, če je masa bremena 1850 kg, masa viličarja brez uteži 1300 kg in masa uteži 450 kg.
2. Izračunajte moment prevrnitve viličarja na sliki, če je masa bremena 1850 kg, masa viličarja brez uteži 1300 kg in masa uteži 450 kg.
3. Izračunajte koeficient stabilnosti viličarja na sliki.
4. Kolikšna je največja masa, ki jo lahko viličar dvigne, da se še ne prevrne?
5. Kolikšna mora biti masa uteži, da bo nosilnost viličarja m_B 2300 kg pri koeficientu stabilnosti $v = 1.4$?

6. Upori vožnje

Upori so sile, ki se upirajo gibanju prevoznih sredstev – zavirajo vozilo. Upori nastanejo zaradi vozil ali zaradi vozne poti.

Upori pri gibanju vozila so:

- upor trenja v ležajih od 0,2N/kN (drsni) do 1N/kN (kotalni) F_L [N] (**zanemarljv**)
- upor pri kotaljenju F_k [N]
- zračni upor F_z [N]
- upor pri premagovanju naklona - strmine F_N [N]
- upor pri pospeševanju oz. zaviranju vozila F_p [N]

Skupni upor gibanja vozila F_u je seštevek vseh uporov gibanja po enačbi:

$$F_u = F_k + F_z \pm F_N \pm F_p$$

Enačba se imenuje **gibalna enačba**, oziroma **bilanca sil**. S pomočjo te enačbe lahko izračunamo, kolikšna mora biti skupna **vlečna sila**, ki je potrebna za premagovanje uporov.

Da se vozilo premika, moramo premagati vse upore gibanja, kar pomeni, da mora biti **vlečna sila vozila večja od vsote vseh uporov gibanja**.

1. Upor kotaljenja F_k

Upor kotaljenja deluje v dotikališču koles s cestiščem, nastane pa zaradi trenja pri kotaljenju in je posledica elastične deformacije kolesa in podlage, oziroma izgubljenega dela zaradi deformacije pnevmatik in vozišča.

Odvisen je od **koeficienta trenja pri kotaljenju** (f_k) ter **obremenitve koles**, ki je odvisna od teže vozila F_g in točke težišča vozila.

V primeru vožnje po ravni cesti se F_k računa po enačbi:

$$F_k = f_k \cdot F_g [N]$$

V primeru vožnje vozila v strmino pa se kotalni upor **zmanjša**. Pri vožnji po klancu navzgor ali navzdol moramo pri izračunu upora kotaljenja upoštevati tudi naklonski kot (α) saj se pri tem normalna sila spremeni.

$$F_k = f_k \cdot F_g \cdot \cos \alpha [N]$$

Koeficient upora pri kotaljenju (f_k) je odvisen od:

- materiala in oblike pnevmatike,
- premera kolesa,
- tlaka v pnevmatiki,
- obremenitve kolesa - normalne sile,
- hitrosti vozila,
- vrste podlage – stanja vozišča,
- kotalne ploskve in delavne temperature.

2. Upor zraka F_z

Aerodinamika je veda o gibanju zraka ali drugih plinov glede na telesa, ki so v njem in o silah, ki pri tem nastajajo. Z aerodinamičnim oblikovanjem si prizadevamo doseči čim manjši upor v zračnem toku. Ena najpomembnejših stvari v aerodinamiki so testiranja v vetrovniku. Vetrovnik je prostor, oblikovan za usmerjanje zračnega toka, potrebnega za preučevanje letal, vozil, ladij... Gre za kanal, v katerega se namesti model, na primer avtomobil. To je povezano z merilnimi instrumenti, s katerimi merijo sile, ki delujejo na model. (Babič & Božič, 2003)

Vsako telo, prek katerega gredo zračni tokovi, ima določen koeficient zračnega upora, čim manjša je njegova vrednost, tem manjši je upor, potrebna je manjša moč za premikanje vozila, zato so nižji tudi poraba in izpusti CO₂.

Toda nastopi problem: z zniževanjem koeficienta zračnega upora se znižuje tudi sila, ki pritiska vozilo k tloraj, kar zna biti pri visokih hitrostih zelo nevarno, saj avtomobil prevzema vlogo krila. Tudi zato ima večina športnih vozil v zadku poseben **spoiler**, ki tokove zračne mase preusmerja navzdol, kar vozilo pritiska proti cesti.

Zračni upor nastane zaradi trenja med zračnimi delci ter čelno in bočnima površinama vozila, deluje v nasprotni smeri vožnje in je odvisen od:

$$F_z = 0,5 \cdot \rho \cdot C_x \cdot A \cdot v_x^2 [N]$$

- projekcije površine vozila v smeri vožnje A [m²] - tako imenovana čelna površina,
- koeficienta zračnega upora C_x ,
- gostote zraka ρ [kg/m³], pri 20°C in 200m n. v. $\rho=1,2$ kg/m³
- hitrosti vozila v [m/s] in
- hitrosti zraka (vetra) v_v [m/s].

Gostota zraka ρ je odvisna od: nadmorske višine, temperature in zračnega tlaka.

Koeficient zračnega upora C_x proizvajalci vozil določajo s preizkušanjem v vetrovniku.

Projekcijo površine vozila določamo po formuli:

- za osebna vozila $A = 0,78 \cdot B \cdot H$
 - za tovorna vozila in avtobus $A = 0,9 \cdot B \cdot H$
- B – največja širina, H – največja višina vozila

Relativna hitrost vozila v_x je odvisna od hitrosti vozila, hitrosti vetra in smeri vetra. zračunamo jo po enačbi:

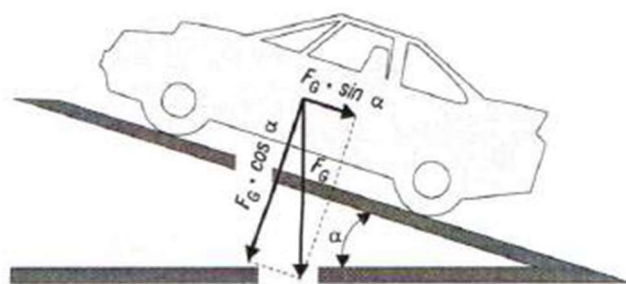
$$v_x = v \pm v_v [m/s]$$

3. Upor nagiba

² Če veter piha v nasprotni smeri vožnje, hitrost vozila in vetra se **seštejeta** in je upor večji. Če veter piha v isti smeri, kot se vozilo pelje se hitrost vetra odšteje od hitrosti vozila.

Upor nagiba je sila, ki deluje na vozilo, kadar se vzpenja po strmem terenu, in deluje v nasprotni smeri gibanja. Pri vzpenjanju po klancu gravitacija ustvarja komponento sile, ki vleče vozilo nazaj, zaradi česar motor potrebuje več moči za premagovanje tega upora. Večji kot je naklon terena, večji je upor nagiba, ki deluje na vozilo.

1. Pri vožnji po klancu navzgor nastopa sila F_N , ki zavira gibanje vozila, velikost te sile raste z večanjem kota nagiba cestišča: $F_U = F_L + F_K + F_Z + F_N + F_P$
2. Ko se vozilo premika po klancu navzdol, gravitacija povzroči pospeševanje vozila **brez potrebe po dodatni moči motorja**, sila F_N ne deluje kot upor temveč kot pospešek (negativni upor): $F_U = F_L + F_K + F_Z - F_N + F_P$



Upor nagiba je odvisen le od teže vozila F_g in od kota naklona α .

$$F_n = F_g \cdot \sin \alpha [N]$$

Silo teže na klancu vedno razstavimo na dve sili. V tem primeru bomo **eno silo usmerili vzporedno s klancem** ($\sin \alpha$), **drugo pa pravokotno na klanec** ($\cos \alpha$). Komponento sile teže vzdolž klanca imenujemo **dinamična komponenta teže**. Komponento teže, ki je pravokotna na klanec, pa imenujemo **statična komponenta teže**. ***Pri potiskanju bremen po klancu navzgor moramo premagovati le dinamično komponento teže, ki pa je pri blagih klancih bistveno manjša od cele teže.*** Potiskanje bremen po klancu je tako vedno lažje kot navpično dviganje bremen.

4. Upor pospeševanja / zaviranja vozila

Ko vozilo pospešuje ali zavira, se pojavi **upor pospeševanja**, ki je v primeru zaviranja (pojemanja) negativen. Upor pospeševanja ali zaviranja povzroča vztrajnost (masa) vozila in vztrajnost rotirajočih delov motorja z notranjim izgorevanjem ter vztrajnost koles.

$$F_P = (m + m_0) \cdot a [N]$$

m - masa vozila (kg),

m_0 – navidezna masa vozila (zaradi rotirajočih delov), običajno **od 2 do 5%** resnične mase vozila,

a – pospeševanje vozila

Ponavljanje

1. Definirajte upor vožnje in naštejte upore, ki deluje v vožnji.
2. Definirajte aerodinamiko in njen pomen v avtomobilizmu.
3. Definirajte upor kotaljenja. Od česa je odvisen?
4. Od česa je odvisen upor zraka? Kako določimo relativno hitrost vozila? Od česa je odvisna gostota zraka?
5. Opišite upor pri premagovanju nagiba? Kako deluje upor, ko se vozilo premika po klancu navzdol?
6. Opišite upor pospeševanja? Od česa je odvisen? Kaj se dogaja z uporom, če vozilo zavira?

Računske naloge

1. Zapišite gibalno enačbo tovornjaka, ki se enakomerno pospešeno giblje po ravni cesti brez naklona.
2. Zapišite gibalno enačbo vozila, ki se z enakomerno hitrostjo pelje po klancu navzdol.
3. Kolikšen je kotalni upor vozila z maso 2.200 kg? Podlaga je slab asfalt.
4. Kolikšen je kotalni upor tovornjaka z skupno maso 25.000 kg? Podlaga je slabi sneg.
5. Izračunajte zračni upor avtomobila, pri hitrosti 60 km/h, ki ima koeficient zračnega upora $C_x=0,5$. Veter piha proti vozilu s hitrostjo 25 m/s. Višina 1,5 m, širina 1,8 m.
6. Izračunajte zračni upor vozila z naslednjimi podatki: projekcija površine tovornjaka v smeri vožnje je $4,6\text{m}^2$. Hitrost vozila je 54 km/h, hitrost vetra pa 10,8 km/h v smeri proti tovornjaku. Gostota zraka pri 20°C in 200 m n.v. je 1400 g/m^3 . Tovornjak ima koeficient zračnega upora $C_x=1.2$
7. Izračunajte zračni upor avtobusa, pri hitrosti 50 km/h, ki ima koeficient zračnega upora $C_x=0,8$. Veter ne zavira avtobus, saj piha v isti smeri s hitrostjo 10 m/s.
8. Izračunajte upor nagiba, za kombi z maso 1.684 kg, ki vozi po avtocesti na gorskem terenu in z največjim dovoljenim nagibom 7%.
9. Izračunajte upor pri pospeševanju vozila, če je masa vozila 2,4t, navidezna masa 4% resnične mase in pospešek vozila 2 m/s^2 .
10. Kolikšen je skupni upor vozila z maso 2230 kg, ki vozi po cesti z naklonom 9 % navzgor, podlaga je slab beton (koeficient kotalnega upora 0,02), hitrost vozila je 55 km/h in pospešuje s pospeškom $0,3\text{ m/s}^2$. Vozilo je široko 1,8m in visoko 2m. Koeficient zračnega upora je $C_x=0.35$, $\rho=1,2\text{ kg/m}^3$, veter piha v nasprotni smeri vožnje s hitrostjo 8 m/s. Upor pospeška znaša 689 N.

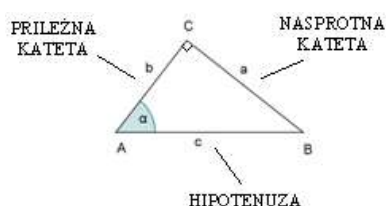
7. Kotne funkcije

Pravokotni trikotnik je trikotnik, ki ima en pravi kot. Praviloma označujemo pravokotni trikotnik tako, da je to kot pri oglišču C, torej: $\gamma = 90^\circ$. Ostala dva kota sta komplementarna, kar pomeni, da velja: $\alpha + \beta = 90^\circ$.

Najdaljšo stranico pravokotnega trikotnika imenujemo **hipotenuza**, ostali dve stranici pa **kateti** in sicer:

- nasprotna stran **nk** (stranica, ki leži nasproti kota α),
- priležna stran **pk** (stranica, ki leži ob kotu α).

Ker je v pravokotnem trikotniku $\gamma = 90^\circ$ (in $\beta = 90^\circ - \alpha$), je razmerje stranic odvisno samo od kota α . Zato razmerja stranic imenujemo **kotne funkcije** (funkcije kota α):



Sinus: $\sin \alpha = \frac{nk}{hip}$

Kosinus: $\cos \alpha = \frac{pk}{hip}$

Tangens: $tg \alpha = \frac{nk}{pk}$

Kotangens: $ctg \alpha = \frac{pk}{nk}$

Kotne funkcije definirajo kot:

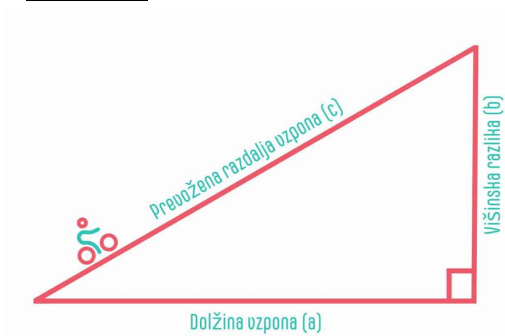
Sinus: razmerje med dolžino nasprotne stranice in dolžino hipotenuze.

Kosinus: razmerje med dolžino priležne stranice in dolžino hipotenuze.

Tangens: razmerje med dolžino nasprotne stranice in dolžino priležne stranice.

Primer uporabe kotnih funkcij: naklon ceste

Naklon klanca se izračuna kot premagana višina na 100 metrov premagane dolžine. Meri se ga v odstotkih.



Za primer, če v sto metrih vzpona pridobite 8 metrov višinske razlike, potem je naklon tega klanca 8 %.

Viri in bibliografija

Babič, N., & Božič, N. (2003). Aerodinamika. Kranj: Srednja elektro in strojna šola Kranj.

Dempsey, P. (2014). Forklift Safety: Best Practices and Common Mistakes. Safety Management Journal.

Hall, A. R. (1992). Isaac Newton: Adventurer in Thought. Oxford: Blackwell.

Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2018). Fundamentals of Physics (10th edition). CLEVELAND STATE UNIVERSITY.

Harl, B., & Kegl, M. (2008). *PREVOZNA SREDSTVA cestnega prometa*. Pridobljeno iz Prometna šola Maribor, Višja prometna šola.

Joupert, & Harris. (2018). Understanding Vehicle Dynamics in Cornering. Springer.