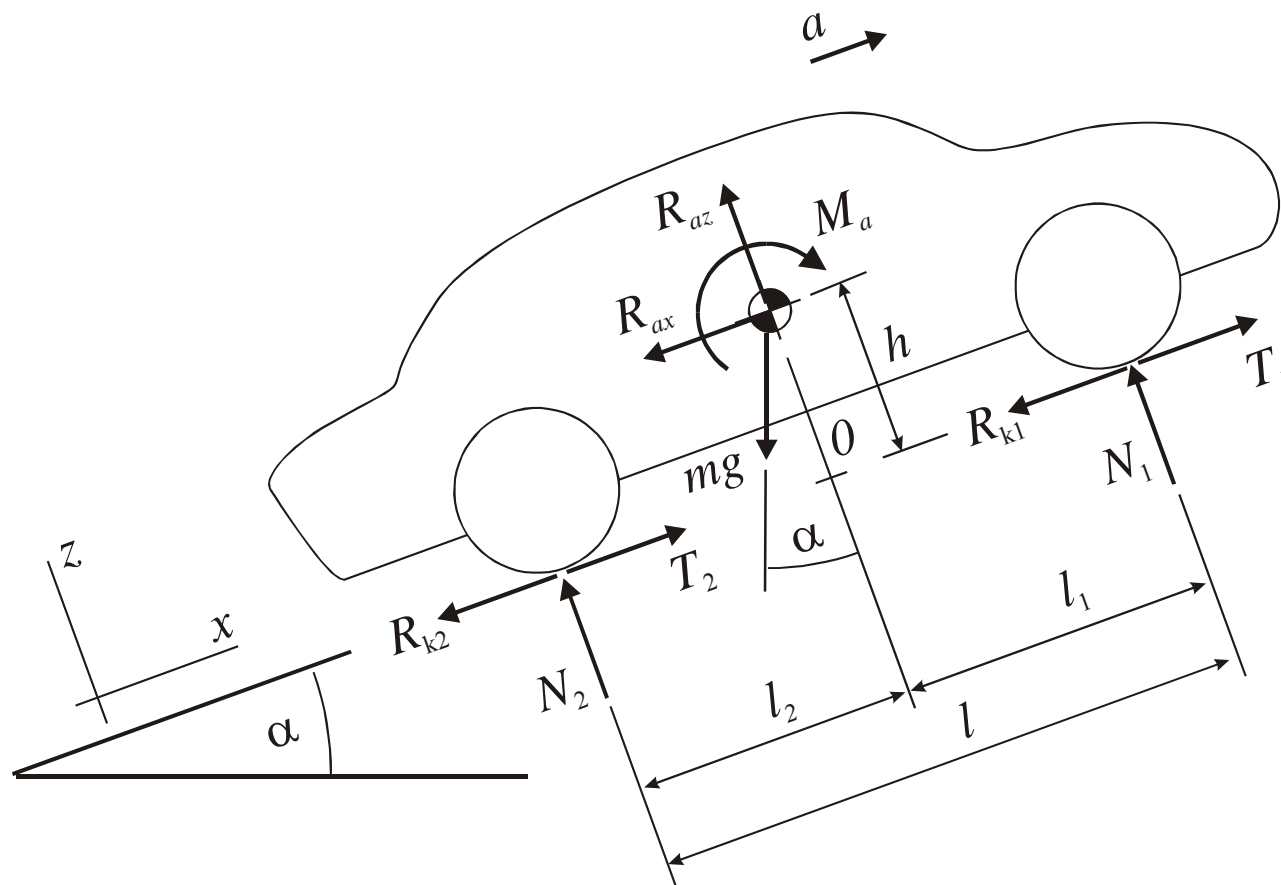


DINAMIKA VOZILA

1. SILE NA VOZILO



Oznake:

a	[m/s ²]	pospešek/pojemek
f	-	koeficient kotalnega upora
g	[m/s ²]	Zemeljski pospešek = 9.8
h	[m]	višina težišča
k_x, k_z	[kg/m]	koeficienta zračnega upora
l, l_1, l_2	[m]	medkolesna razdalja
m	[kg]	masa vozila
M_a	[Nm]	aerodinamični moment
R_{k1}, R_{k2}	[N]	kotalni upor
R_{ax}, R_{az}	[N]	aerodinamični upor
T_1, T_2	[s]	vlečni/zavorni sili
α	-	kot naklona ceste
μ_1, μ_2	-	koeficient trenja

1.1 Vlečna/zavorna sila

$$T \leq \mu N$$

Povprečne vrednosti adhezijskega koeficienta (Wong str. 26):

Vrsta in stanje vozišča		μ_{\max}	μ_z
Beton	suh	0.8-0.9	0.75
	moker	0.8	0.7
Asfalt	suh	0.8-0.9	0.75
	moker	0.5-0.7	0.45-0.6
Zemljaska pot	suha	0.68	0.65
	mokra	0.55	0.4-0.5
Kocke	-	0.6	0.55
Sneg	utrjen	0.2	0.15
Led	-	0.1	0.07

1.2 Kotalni upor

$$R_k = f N$$

Koeficient kotalnega upora f je odvisen od hitrosti, tlaka v pnevmatikah, normalne sile, velikosti pnevmatike in kontaktne ploskve, vrste in strukture materiala pnevmatike, stanja vozišča, delavne temperature,...

Empirična zveza (Rotim II, str. 65, Genta str. 53): $f = f_0 (1 + aV^2)$

f_0 koeficient kotalnega upora pri hitrosti 60 km/h

V hitrost v km/h

a konstanta $(4 \div 5)10^{-5}$

Vrsta in stanje vozišča		f_0
Beton	odlično	0.010
	srednje	0.015
	slabo	0.020
Asfalt	odlično	0.012
	srednje	0.017
	slabo	0.022
Makadam	odličen	0.016
	srednji	0.023
	s prahom	0.026
	poškodovan	0.037
Kocke	-	0.043
Sneg	do 50 mm	0.25 ?
	do 100 mm	0.38 ?
Led	-	0.019
Pesek	suh	0.30
	vlažen	0.10

1.3 Aerodinamične sile in momenti (Wong str. 175-187, Genta str 95-139)

$$R_{ax} = \frac{1}{2} \rho C_x A v_r^2 = K_x A v_r^2 = k_x v_r^2$$
$$R_{az} = \frac{1}{2} \rho C_z A v_r^2 = K_z A v_r^2 = k_z v_r^2$$
$$M_a = \frac{1}{2} \rho C_m A l v_r^2 = K_z A l v_r^2 = k_z l v_r^2$$

Oznake:

A	$[m^2]$	značilna površina vozila, običajno sprednja, ki je projekcija površine vozila na smer gibanja. Za osebna vozila z maso $m = 800 \div 2000 \text{ kg} \Rightarrow A = 1.6 + 0.00056(m - 765) \text{ m}^2$
C_x, C_z, C_M	-	koeficienti aerodinamičnega upora
K	$[Ns^2/m^4]$	koeficient zračnega upora
v_r	$[m/s]$	relativna hitrost vozila, glede na zrak $= v \pm v_z$
ρ	$[kg/m^3]$	gostota zraka $= 1.23 \text{ kg/m}^3$ pri temperaturi $15.5 \text{ }^\circ\text{C}$ in tlaku 101.32 kPa

Vzgonska sila R_{az} je posledica tlačne razlike med streho dnom vozila in deluje kot zmanjšanje (ali povečanje) teže vozila. Pomebna je za stabilnost vožnje. Odvisna je od celotne oblike vozila. Običajna vrednost koeficienta upora je za osebna vozila pri normalnem vetru od 0.3 do 0.5, pri navzkrižnem vetru pa doseže vrednost 1 ali več.

Aerodinamični moment deluje na razporeditev obremenitve med osema in je posledica tega, ker aerodinamična sila ne deluje v težišču vozila. Vrednost koeficienta upora so med 0.05 do 0.2.

Osebna vozila (okvirni podatki):

Razred vozila	Koeficient C_x	Čelna ploskev $A [m^2]$
Mala vozila (Fiat Uno, Peugeot 205,...)	0.33 – 0.44	1.72 – 1.83
Spodnji srednji (VW Golf, Ford Escort,...)	0.35 – 0.46	1.76 – 1.91
Srednji (VW Pasat, BMW 318,..)	0.36 – 0.43	1.86 – 1.89
Zgornji srednji (Mercedes 190, BMW 518,...)	0.30 – 0.42	1.90 – 2.16
Luksuzna (Mercedes 500, BMW 728,...)	0.34 – 0.44	1.92 – 2.16
Športna (Porsche 924,...)	0.31 – 0.40	1.74 – 1.84

Lampert (str. 230):

Tip vozila	Koeficient C_x
Osebna vozila	0.41
Kombiji	0.44
Kamioni	0.85
Motoristi	0.55

Popovič (str.64):

L – dolžina vozila [m]

H – višina vozila [m]

Čelna površina:

- osebna vozila $A = 0.78 LH \text{ m}^2$
- kamioni in avtobusi $A = (0.9 \div 1.0) LH \text{ m}^2$

Vozila	Koefficient $K \text{ [Ns}^2/\text{m}^4\text{]}$.	Čelna ploskev $A \text{ [m}^2\text{]}$	$K \times A \text{ [Ns}^2/\text{m}^2\text{]}$	Sila $R_z \text{ [N]}$	
				$v = 72 \text{ km/h}$	$v = 108 \text{ km/h}$
Lahka	0.20– 0.35	1.6 – 2.8	0.3 – 0.9	129 – 360	270 – 810
Teška	0.60 – 0.70	3.0 – 5.0	1.8 – 3.5	720 – 1400	1620 – 3150
Avtobusi	0.25 – 0.40	4.5 – 6.5	1.0 – 2.6	400 – 1040	900 – 2340
Dirkalna	0.13 – 0.15	1.0 – 1.3	1.3 – 1.8	520 – 720	1170 – 1620

2.1 Reakcija podlage

Gibalne enačbe:

$$x: \quad m a = T_1 + T_2 - R_{ax} - R_{k1} - R_{k2} - m g \sin \alpha$$

$$z: \quad 0 = N_1 + N_2 + R_{az} - m g \cos \alpha$$

$$M^{(0)}: \quad 0 = N_1 l_1 - N_2 l_2 - M_a + (m g \sin \alpha + R_{ax} + m a) h$$

ali

$$\begin{aligned} m a &= T_1 + T_2 - R_{ax} - f (m g \cos \alpha - R_{az}) - m g \sin \alpha \\ 0 &= N_1 + N_2 + R_{az} - m g \cos \alpha \\ 0 &= N_1 l_1 - N_2 l_2 - M_a + (m g \sin \alpha + R_{ax} + m a) h \end{aligned}$$

Dodatna pogoja:

$$T_1 \leq \mu_1 N_1, \quad T_2 \leq \mu_2 N_2$$

$$\begin{array}{l}
 N_1 = mg \frac{l_2 \cos \alpha - h \sin \alpha}{l} - \frac{h}{l} (ma + R_{ax}) - \frac{R_{az} l_2 - M_a}{l} \\
 N_2 = mg \underbrace{\frac{l_1 \cos \alpha + h \sin \alpha}{l}}_{\text{statična obremenitev}} + \underbrace{\frac{h}{l} (ma + R_{ax}) - \frac{R_{az} l_1 + M_a}{l}}_{\text{dinamična obremenitev}}
 \end{array}$$

$$\text{ali } (ma + R_{ax} = \underbrace{T_1 + T_2}_{= F} - f (mg \cos \alpha - R_{az}) - mg \sin \alpha)$$

$$\begin{array}{l}
 N_1 = mg \frac{l_2 + f h}{l} \cos \alpha - \frac{h}{l} (F - f R_{az}) - \frac{R_{az} l_2 - M_a}{l} \\
 N_2 = mg \frac{l_1 + f h}{l} \cos \alpha + \frac{h}{l} (F + f R_{az}) - \frac{R_{az} l_1 + M_a}{l}
 \end{array}$$

Okvirne dimenzije vozil (Popovič str. 62)

Razmerje	Vozila			Obremenitev
	Osebna	Kamioni	Avtobusi	
l_1/l	0.45 – 0.55	0.55 – 0.75	0.40 – 0.55	obremenjen
l_2/l	0.45 – 0.55	0.25 – 0.45	0.45 – 0.60	obremenjen
h [m]	0.60 – 0.75	0.60 – 1.2		obremenjen
	0.45 – 0.65	0.65 – 1.0	0.70 – 1.2	neobremenjen

Porazdelitev obremenitve pri enakomernem gibanju (mirovanju):

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{l_2 \mp h \tan \alpha}{l_1 \mp h \tan \alpha}$$

Primer: (Genta str.143) Kakšna je razporeditev osnih sil na osebno vozilo, če:

- a) vozilo miruje
- b) vozi s hitrostjo 100 km/h po ravni cesti
- c) zavira s pojemkom 0.4 g pri hitrosti 100 km/h na ravni cesti
- d) pospeševanje s pospeškom 0.1 g pri hitrosti 100 km/h na ravni cesti
- e) vozi s hitrostjo 70 km/h v klanec nagiba 10 %

Podatki: $m = 830$ kg, $h = 530$ mm, $l = 2160$ mm, $l_1 = 870$ mm, $l_2 = 2160 - 870 = 1290$ mm

Rešitev:

a) vozilo miruje ($\alpha = a = R_z = 0$)

$$N_1 = \frac{1.29 \times 830 \times 9.8}{2.16} = \underline{4857 \text{ N}}$$
$$N_2 = \frac{0.87 \times 830 \times 9.8}{2.16} = \underline{3276 \text{ N}}$$

b) vozilo vozi s hitrostjo 100 km/h ($\alpha = a = 0$):

površina čelne ploskve (ocena): $A = 1.6 + 0.00056 \times (830 - 765) = 1.63 \text{ m}^2$

koeficient aerodinamičnega upora (ocena) : $C_x = 0.41$

sila zračnega upora: $R_z = \frac{1}{2} \times 1.23 \times 0.41 \times 1.63 \times \left(\frac{100}{3.6}\right)^2 = 317 \text{ N}$

$$N_1 = 4857 - \frac{0.53}{2.16} \times 317 = \underline{4779 \text{ N}}$$

$$N_2 = 3276 + \frac{0.53}{2.16} \times 317 = \underline{3354 \text{ N}}$$

c) zaviranje s pojemkom 0.4 g pri hitrosti 100 km/h na ravni cesti ($\alpha = 0$)

pojemek : $a = -0.4 \times 9.8 = -3.92 \text{ m/s}^2$

$$N_1 = 4857 - \frac{0.53}{2.16} \times (-830 \times 3.92 + 317) = \underline{5577 \text{ N}}$$

$$N_2 = 3276 + \frac{0.53}{2.16} \times (-830 \times 3.92 + 317) = \underline{2555 \text{ N}}$$

d) pospeševanje s pospeškom $0.1 g$ pri hitrosti 100 km/h na ravni cesti

$$\text{pojemek : } a = 0.1 \times 9.8 = 0.98 \text{ m/s}^2$$

$$N_1 = 4857 - \frac{0.53}{2.16} \times (830 \times 0.98 + 317) = \underline{4579 \text{ N}}$$

$$N_2 = 3276 + \frac{0.53}{2.16} (830 \times 0.98 + 317) = \underline{3553 \text{ N}}$$

e) vozilo vozi s hitrostjo 70 km/h v klanec nagiba 10% ($a = 0$)

$$\text{silna zračnega upora: } R_z = \frac{1}{2} \times 1.23 \times 0.41 \times 1.63 \times \left(\frac{70}{3.6} \right)^2 = 155 \text{ N}$$

$$\text{kot naklona klanca: } \alpha = \arctan \frac{10}{100} = 5.71^\circ$$

$$N_1 = 4857 \times \left(\cos 5.71^\circ - \frac{0.53}{1.29} \sin 5.71^\circ \right) - \frac{0.53}{2.16} \times 155 = \underline{4596 \text{ N}}$$

$$N_2 = 3276 \times \left(\cos 5.71^\circ + \frac{0.53}{0.87} \sin 5.71^\circ \right) + \frac{0.53}{2.16} \times 317 = \underline{3432 \text{ N}}$$

2.2 Največja vlečna sila

Pri enokomernem gibanju je skupni upor gibanju

$$R = R_{ax} + f mg \cos \alpha$$

a) Pogon na sprednji kolesi: $F_{\max} = T_1 = \mu N_1, T_2 = 0 \Rightarrow F_{\max} = \mu mg \frac{l_2 + f h}{l + \mu h} \cos \alpha$

b) Pogon na zadnji kolesi: $T_1 = 0, F_{\max} = T_2 = \mu N_2 \Rightarrow F_{\max} = \mu mg \frac{l_1 - f h}{l - \mu h} \cos \alpha$

c) Pogon na vsa kolesa: $F_{\max} = T_1 + T_2 = \mu(N_1 + N_2) \Rightarrow F_{\max} = \mu m g \cos \alpha$

Primer: Izračun maksimalne vlečne sile za športno vozilo s podatki $m=1480$ kg, $h=420$ mm, $l_1=1421$ mm, $l_2=1029$ mm, $l=2450$ mm, $\mu=0.5$ in $f=0.02$ pri vožnji po ravni cesti.

Rešitev:

a) Pogon na sprednji kolesi: $F_{\max} = 0.5 \times 1480 \times 9.8 \times \frac{1029 + 0.02 \times 420}{2450 + 0.5 \times 420} = \underline{2828 \text{ N}}$

b) Pogon na zadnji kolesi: $F_{\max} = 0.5 \times 1480 \times 9.8 \times \frac{1421 - 0.02 \times 420}{2450 - 0.5 \times 420} = \underline{4573 \text{ N}}$

c) Pogon na vsa kolesa: $F_{\max} = 0.5 \times 1480 \times 9.8 = \underline{7252 \text{ N}}$

2.3 Največji vzpon

Predpostavke:

- konstantna majhna hitrost: $\Rightarrow a = 0, R_z \approx 0$

Ravnotežje: $F_{\max} = mg (f \cos \alpha + \sin \alpha)$

a) Pogon na sprednji kolesi: $\tan \alpha_{\max} = \frac{\mu l_2 - f l}{l + \mu h}$

b) Pogon na zadnji kolesi: $\tan \alpha_{\max} = \frac{\mu l_1 - f l}{l - \mu h}$

c) Pogon na vsa kolesa: $\tan \alpha_{\max} = \mu - f$

2.4 Največja hitrost

Predpostavke:

- konstantna hitrost: $a = 0$
- horizontalno cestišče: $\alpha = 0^0$

Gibalna enačba: $F_{\max} = mg f + k v^2 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{F_{\max} - mg f}{k}}$

a) Pogon na sprednji kolesi: $v_{\max} = \sqrt{\frac{mg \frac{\mu l_2 - f l}{l + \mu h}}{k}}$

b) Pogon na zadnji kolesi: $v_{\max} = \sqrt{\frac{mg \frac{\mu l_1 - f l}{l - \mu h}}{k}}$

c) Pogon na vsa kolesa: $v_{\max} = \sqrt{\frac{mg}{k} (\mu - f)}$

2.5 Največji pospešek

Predpostavke:

- majhna hitrost: $\Rightarrow R_z \approx 0$
- horizontalno cestišče: $\alpha = 0^0$

Gibalna enačba: $m \delta a_{\max} = F_{\max} - mg f \Rightarrow a_{\max} = \frac{F_{\max} - mg f}{m \delta}$

a) Pogon na sprednji kolesi: $a_{\max} = \frac{g}{\delta} \frac{\mu l_2 - f l}{l + \mu h}$

b) Pogon na zadnji kolesi: $a_{\max} = \frac{g}{\delta} \frac{\mu l_1 - f l}{l - \mu h}$

c) Pogon na vsa kolesa: $a_{\max} = \frac{g}{\delta} (\mu - f)$

Opomba: masni faktor $\delta = 1 + \frac{m_r}{m}$ kjer je m_r ekvivalentna masa rotacijskih delov.

Empirično za osebna vozila (Wong, str.211): $\delta = 1.04 + 0.0025 \xi_0^2$ kjer je ξ_0 skupno prestavno razmerje prenosa.