

OSNOVI AERODINAMIKE DRUMSKIH VOZILA



OSNOVI AERODINAMIKE DRUMSKIH VOZILA

Značaj:

- Potrošnja goriva
- Stabilnost / održavanje pravca (sile izdizanja, bočni vetar)
- Komfor i ergonomija (buka / vibracije, provetrvanje, grejanje i klimatizacija, prljanje stakala i ogledala)
- Hlađenje motora, transmisije, kočnog sistema...
- Maksimalna brzina

OPSTRUJAVANJE IDEALNOG FLUIDA OKO SIMETRIČNOG OBJEKTA

Cilj izučavanja: ustanoviti zakonitost raspodele pritiska kojim fluid deluje na objekat

- Statički pritisak p_{ST}
 - Dinamički pritisak $p_{DIN} = \frac{\rho \cdot v^2}{2}$
- Totalni pritisak: $p_{DIN} + p_{ST} = p_{TOT}$

Daleko od objekta:

neporemećeno strujanje;

$$p_{ST} = p_{Atm}, v = v_{\infty}$$

v_{∞} - relativna brzina opstrujavanja objekta

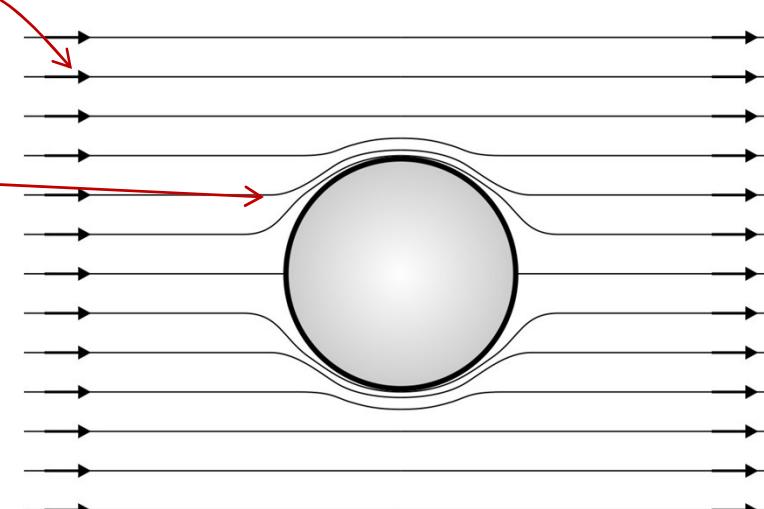
U zoni blizu objekta p_{ST} i

v (tj. p_{DIN}) su promenljivi

Bernulijeva jednačina:

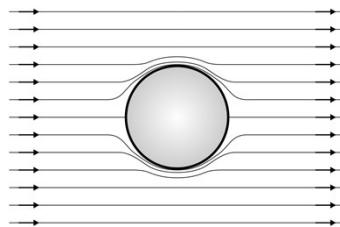
$$p_{DIN} + p_{ST} = \text{const} = p_{TOT}$$

(idealni fluid)

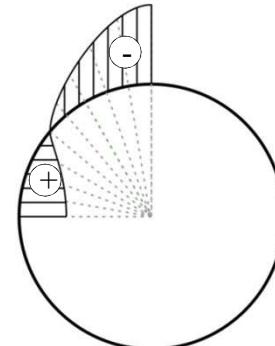
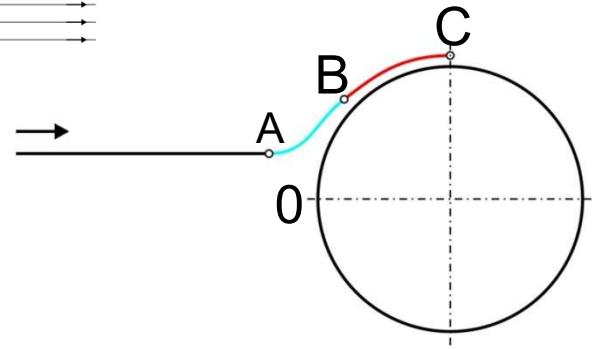


OPSTRUJAVANJE IDEALNOG FLUIDA OKO SIMETRIČNOG OBJEKTA

Utvrđivanje raspodele pritiska duž objekta: posmatra se jedna izolovana strujnica u blizini objekta



$$p_{TOT} = \frac{\rho \cdot v_{\infty}^2}{2} + p_{Atm}$$



0: zaustavna tačka $\Rightarrow v = 0 \Rightarrow p_{ST} = p_{TOT}$

A \rightarrow B: konkavna krivina; u predelu iznad strujnice vlada $p_{ST} = p_{Atm}$; da bi strujnica bila savijena naviše, mora u toj zoni biti $p_{ST} > p_{Atm}$ (takođe samim tim: $v < v_{\infty}$)

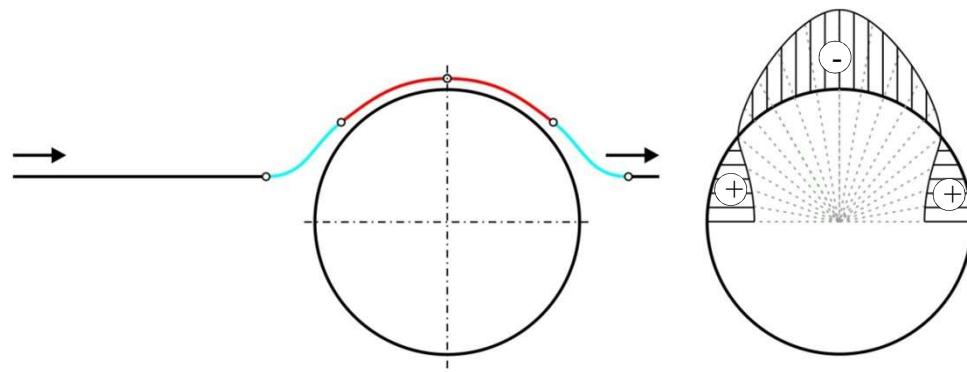
B: prevojna tačka: $p_{ST} = p_{Atm}$

B \rightarrow C: konveksna krivina; u predelu iznad strujnice vlada $p_{ST} = p_{Atm}$; da bi strujnica bila savijena naniže, mora u toj zoni biti $p_{ST} < p_{Atm}$ (takođe samim tim: $v > v_{\infty}$)

Zaključak: zakonitost raspodele pritisaka na posmatranom delu objekta (prednja strana, gornji segment) prikazana šematski desno

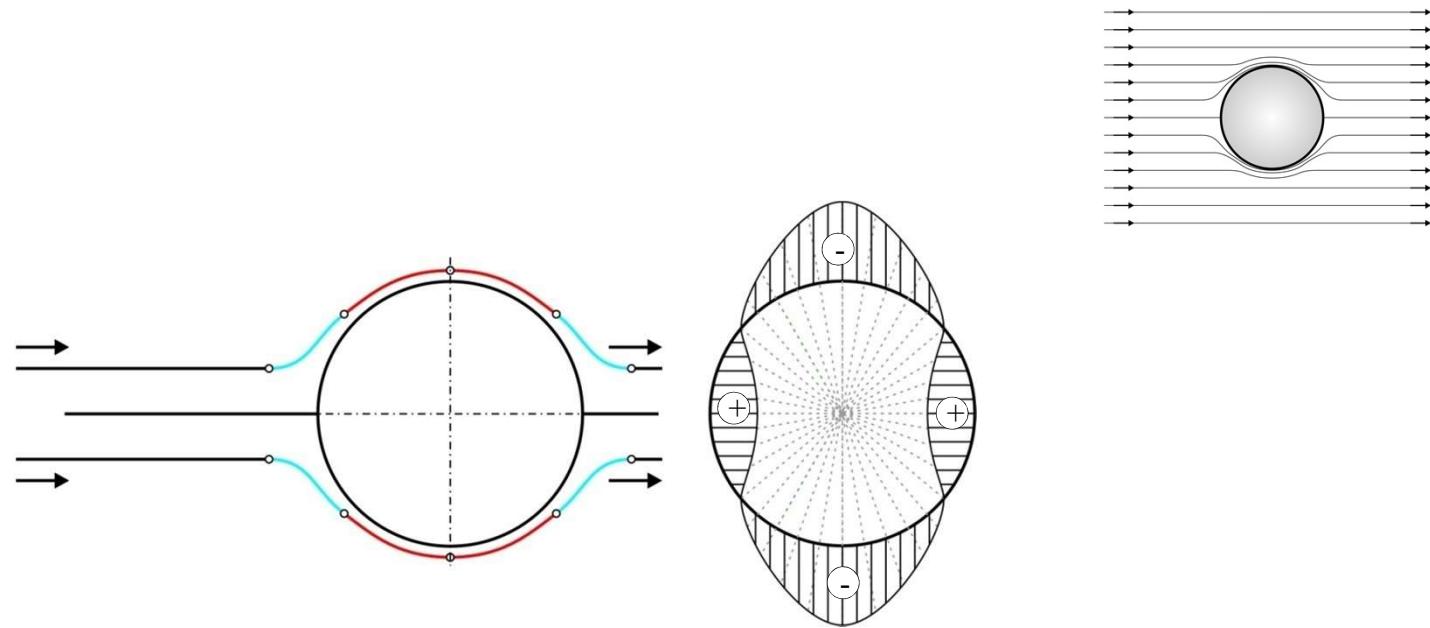
OPSTRUJAVANJE IDEALNOG FLUIDA OKO SIMETRIČNOG OBJEKTA

Simetrija: analogno razmatranje važi i za zadnji...



OPSTRUJAVANJE IDEALNOG FLUIDA OKO SIMETRIČNOG OBJEKTA

...i za donji deo objekta.



Zaključak: uprkos interakciji između fluida i objekta, rezultujuća sila pritiska = 0!

“D'Alembertov paradoks”; važi i za nesimetrične objekte!

Pažnja: zaključak važi za idealan (neviskozan) fluid!

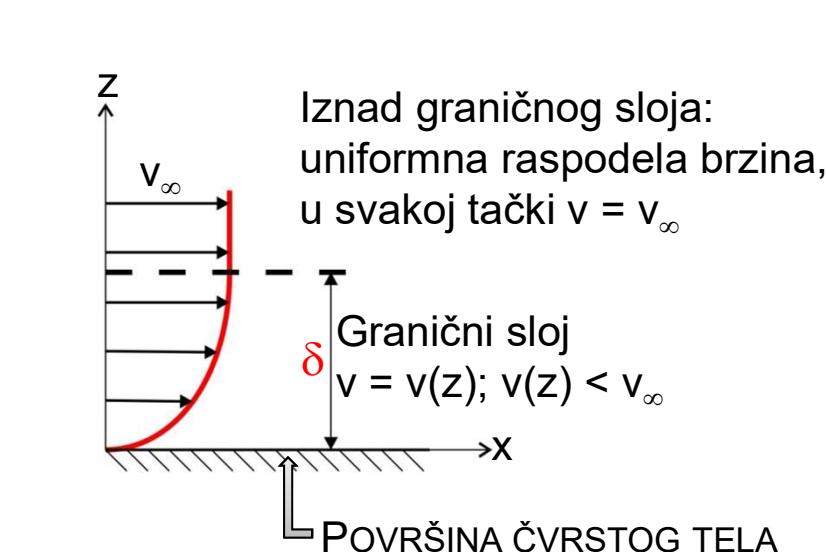
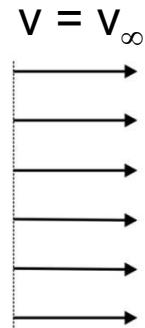
☞ važan zaključak o gradijentu pritiska!

OPSTRUJAVANJE REALNOG FLUIDA OKO OBJEKTA

Primena izvedenih zaključaka na realan slučaj

Pojam graničnog sloja viskoznog fluida

Slobodno strujanje fluida:
uniformna raspodela brzina,
u svakoj tački $v = v_\infty$

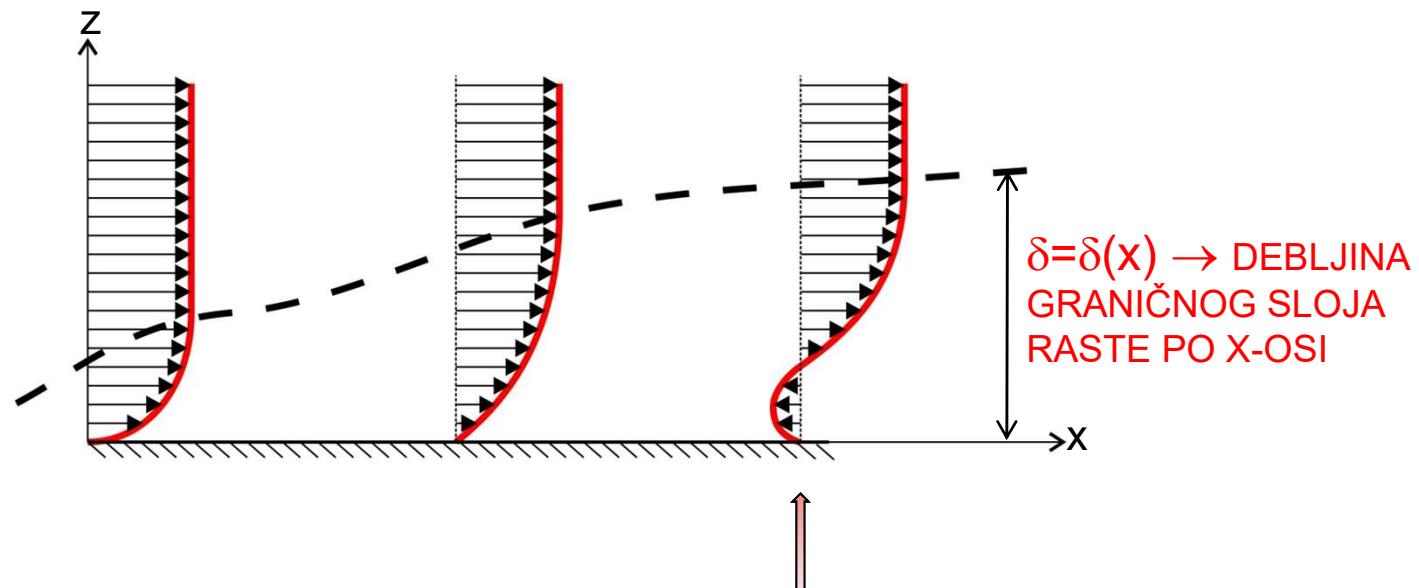


Strujanje viskoznog fluida uz površinu čvrstog tela:
prijanjanje fluida uz telo, formiranje profila brzina
 $v=v(z)$

δ - debljina graničnog sloja

OPSTRUJAVANJE REALNOG FLUIDA OKO OBJEKTA

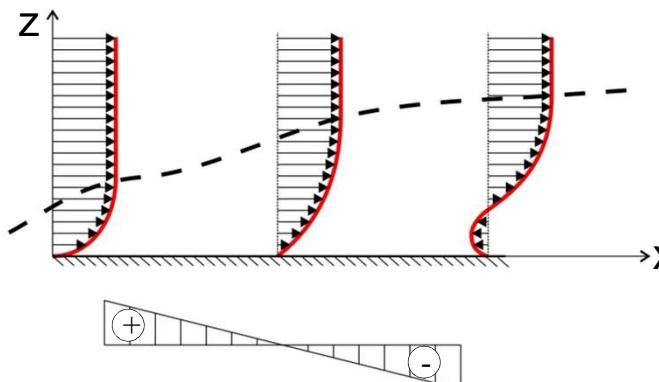
Debljina graničnog sloja duž objekta (gledano u smeru relativne brzine opstrujavanja) teži da poraste:



Porast debljine teži da izazove odvajanje (separaciju)
graničnog sloja od površine objekta

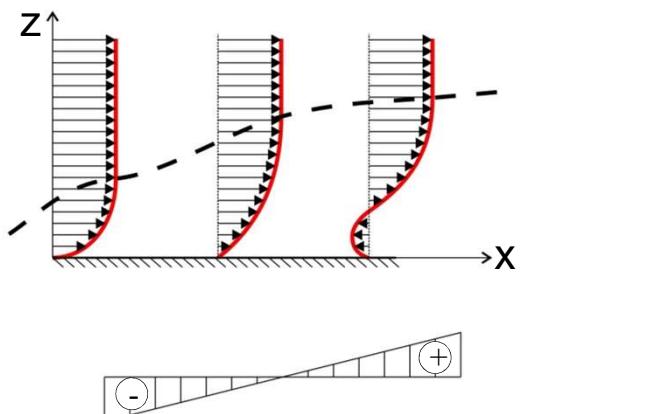
OPSTRUJAVANJE REALNOG FLUIDA OKO OBJEKTA

Uticaj gradijenta pritiska na karakteristike formiranja graničnog sloja



$$\frac{\partial p}{\partial x} < 0$$

Povoljan gradijent: podstiče strujanje fluida uz površinu, debljina δ sporije raste, suprotstavlja se separaciji

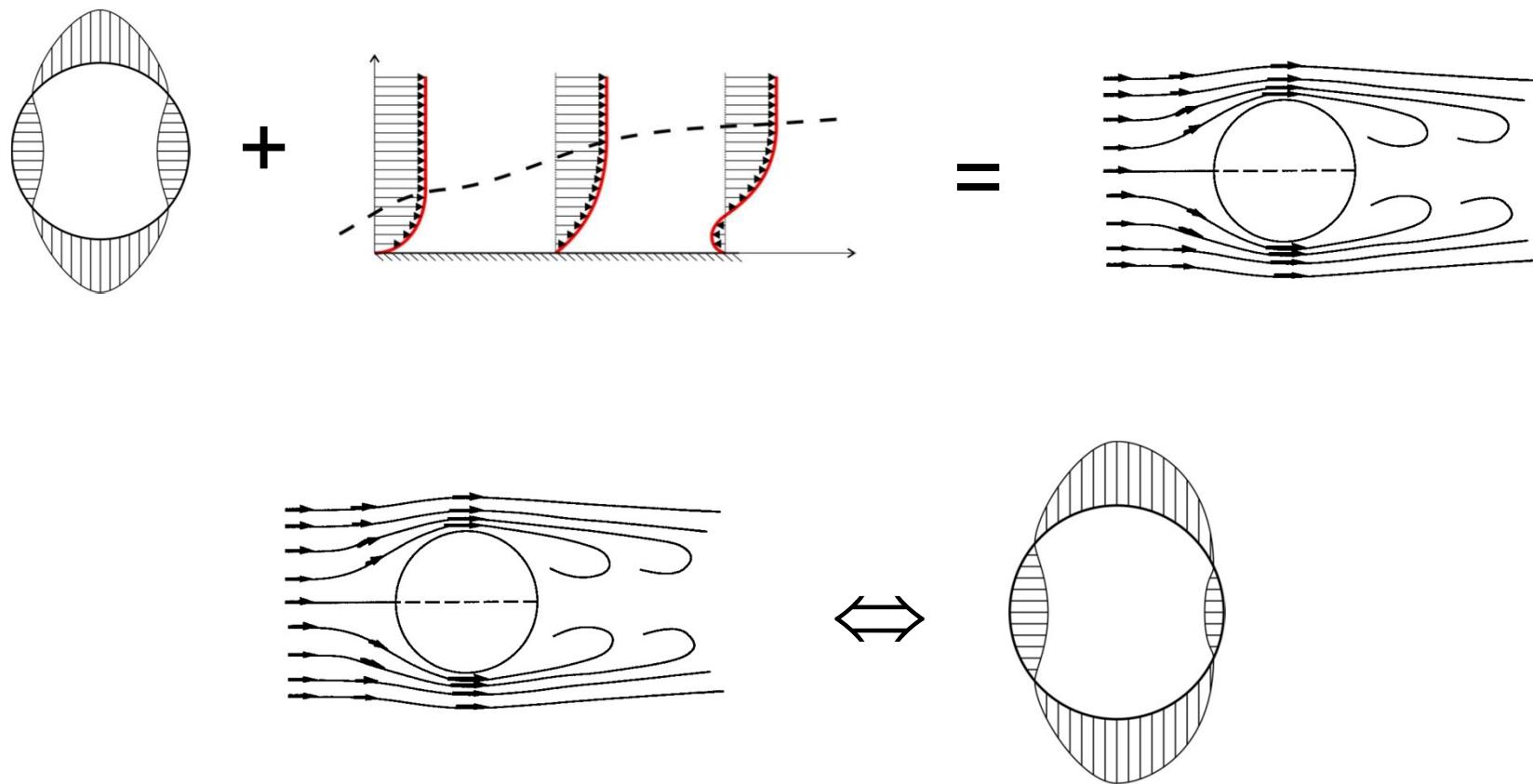


$$\frac{\partial p}{\partial x} > 0$$

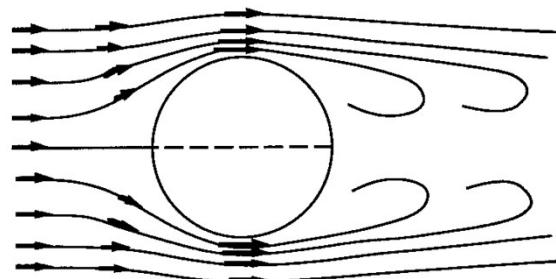
Nepovoljan gradijent: suprotstavlja se strujanju, debljina δ raste brže, podstiče separaciju

OPSTRUJAVANJE REALNOG FLUIDA OKO OBJEKTA

Separacija graničnog sloja kao uzrok pojave aerodinamičke sile



OSNOVI AERODINAMIKE DRUMSKIH VOZILA



Oblik tela utiče na karakter opstrujavanja!

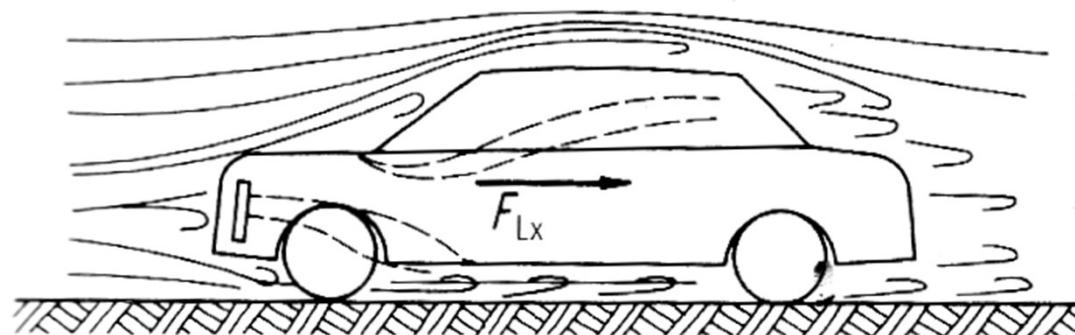
Odvajanje graničnog sloja \Rightarrow potpritisak na zadnjoj strani, manifestacija: intenzivno vrtloženje

Razlika u raspodeli pritiska
(tj. razlika u *veličinama površina* izloženih pritisku) \Rightarrow
rezultujuća sila otpora kretanja
OTPOR OBLIKA

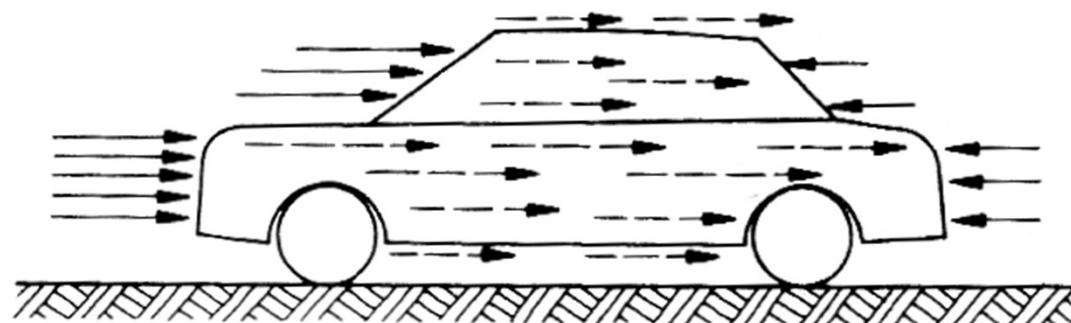
Dodatni otpor: **OTPOR TRENJA**

DVA UZROKA
OTPORA VAZDUHA

OSNOVI AERODINAMIKE DRUMSKIH VOZILA



Šematski prikaz
opstrujavanja vozila



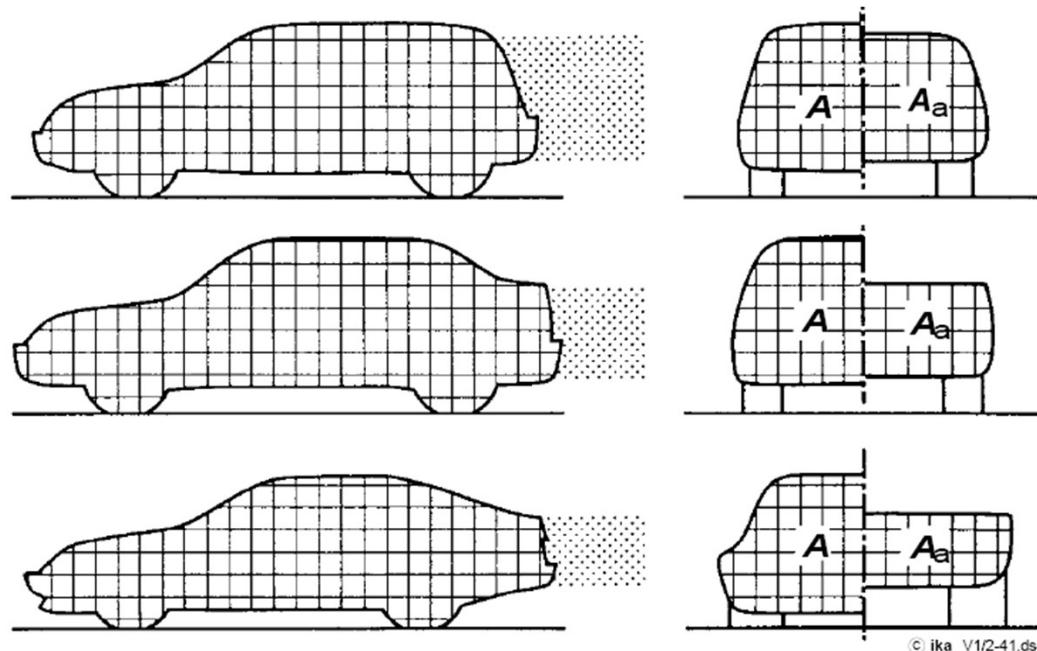
Dva uzroka pojave
otpora vazduha:

Razlika pritisaka ~90%
(otpor oblika) 

Trenje vazduha i vozila ~10% 

Izvor: *Mitschke*

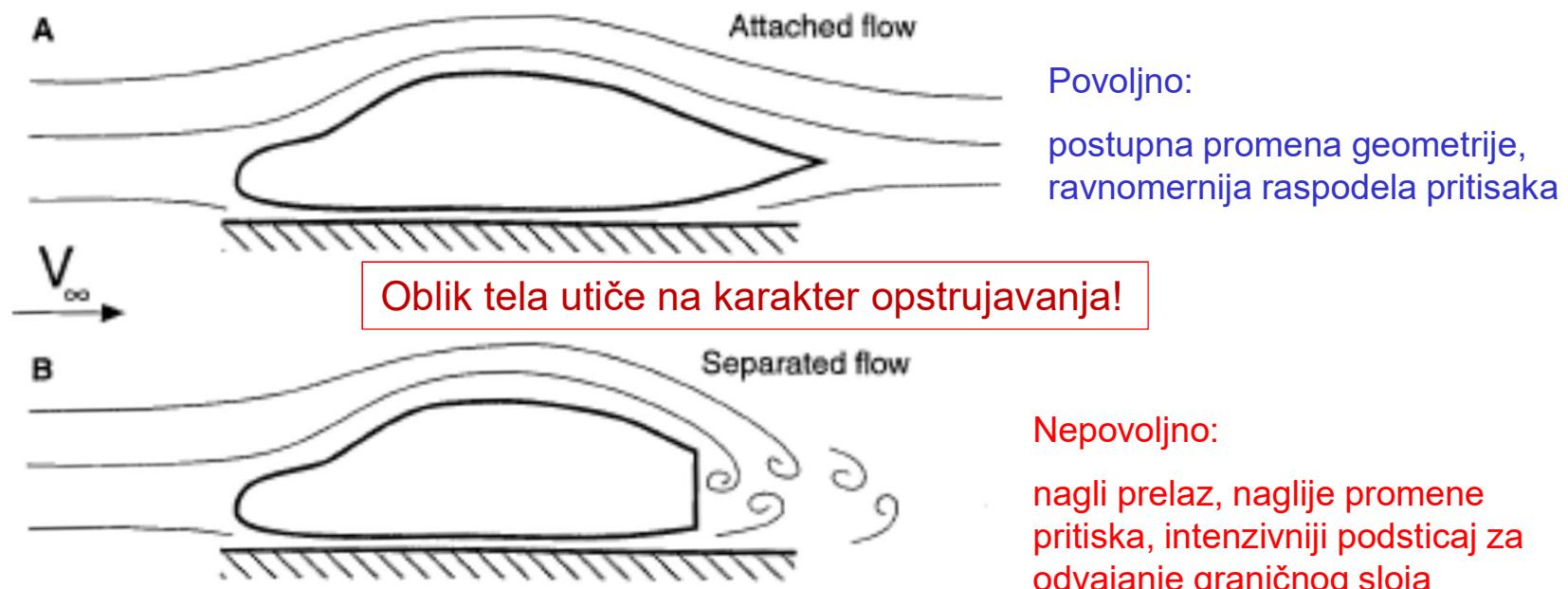
OSNOVI AERODINAMIKE DRUMSKIH VOZILA



Izvor: *Walentowitz*

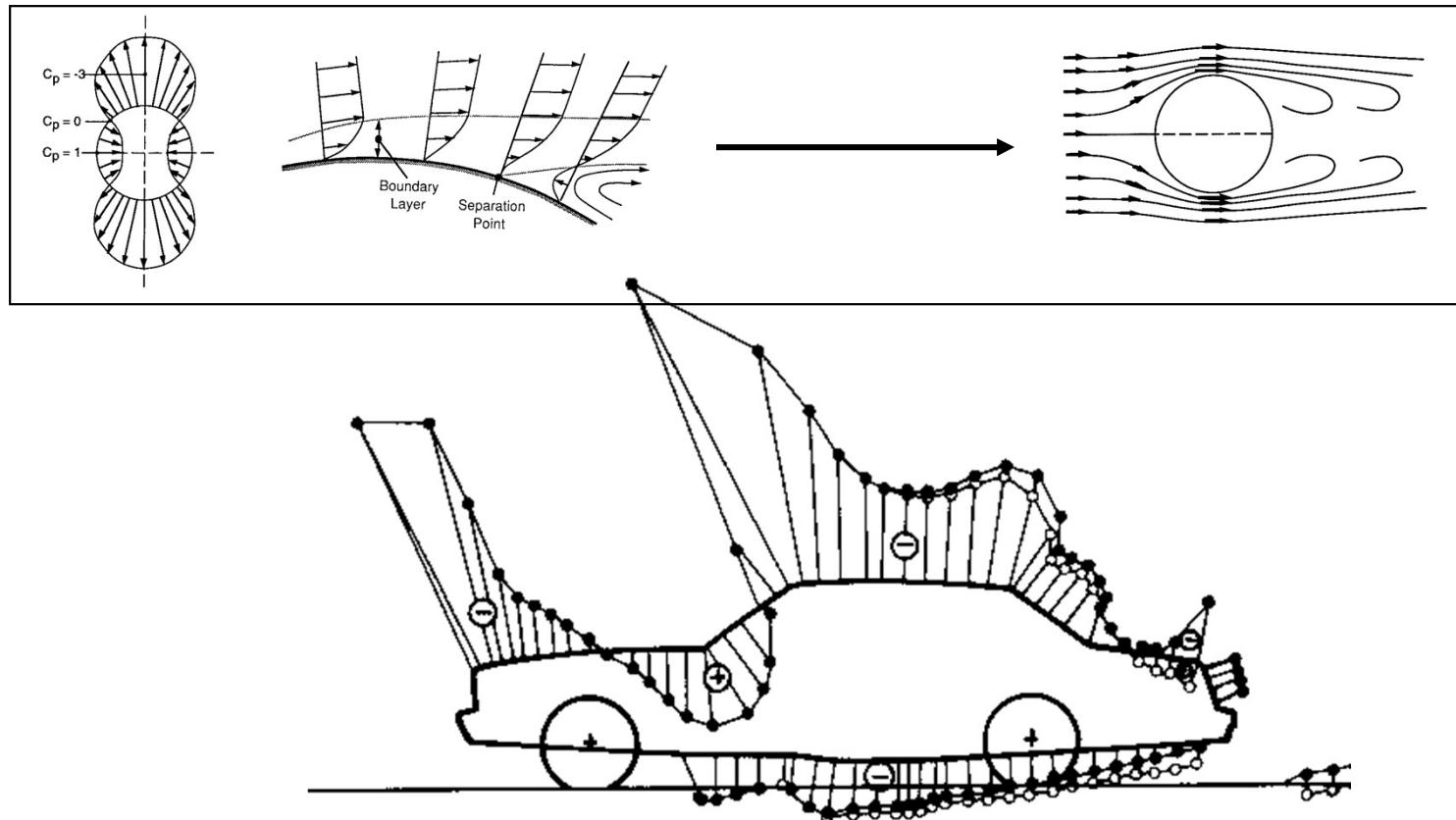
Razlika u veličinama površina izloženih pritisku

OSNOVI AERODINAMIKE DRUMSKIH VOZILA



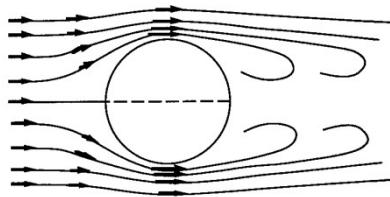
Izvor: *Race car aerodynamics*

OSNOVI AERODINAMIKE DRUMSKIH VOZILA



Raspodela pritisaka – primer

IZRAČUNAVANJE OTPORA VAZDUHA



$$A_{\text{NAPRED}} > A_{\text{NAZAD}} \Rightarrow F_{\text{REZ}} \sim p \cdot \Delta A$$

ΔA – razlika u veličinama površina sa prednje i zadnje strane tela
(glezano u pravcu strujanja)

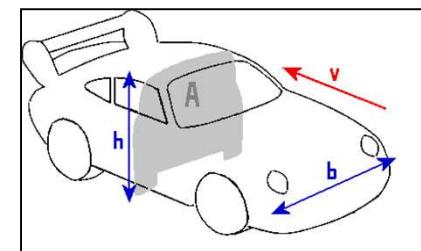
Remećenje strujanja → Suprotstavljanje kinetičkoj energiji fluida →
merodavan je **dinamički pritisak**

$$p_{\text{DIN}} = \frac{\rho \cdot v^2}{2}$$

Umesto ΔA uvodi se empirijski koeficijent c_w :

$$F_w = c_w \cdot A \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}$$

- **SILA OTPORA VAZDUHA**



c_w – koeficijent OTPORA OBLIKA vozila

(ali uzima u obzir i otpor trenja! – zbog eksperimentalnog načina određivanja)

IZRAČUNAVANJE OTPORA VAZDUHA

$$F_w = c_w \cdot A \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}$$

F_w (N), c_w (-), $A(m^2)$, $v(m/s)$

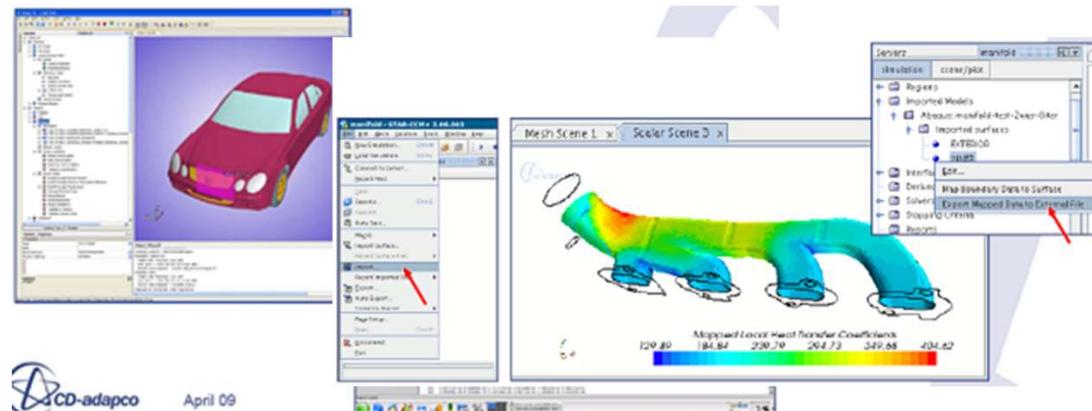
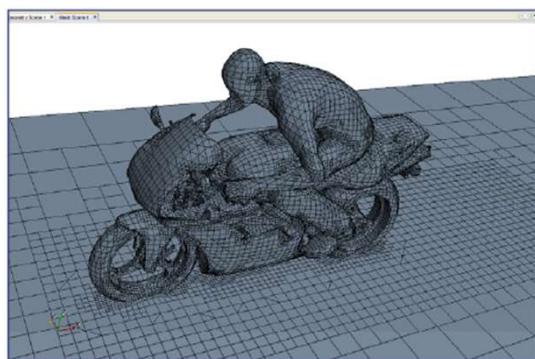
za: $w=60\%$, $t=15\text{ }^\circ\text{C} \Rightarrow \rho=1.225\text{ kg/m}^3$

ORIJENTACIONE VREDNOSTI C_w

- Putnička vozila ~ 0,3
- Dostavna vozila ~ 0,4 ÷ 0,6 (zatvorena ili otvorena karoserija?)
- Kamioni ~ 0,6 ÷ 1 (spoјleri, različite forme tovarnog prostora)
- Bicikli, motocikli ~ 0,5 ÷ 0,9 (uticaj oklopa i položaja vozača)
- Formula 1 ~ 0,7 ÷ 1,1 (podešenost spojlera)

ODREĐIVANJE KOEFICIJENTA c_w

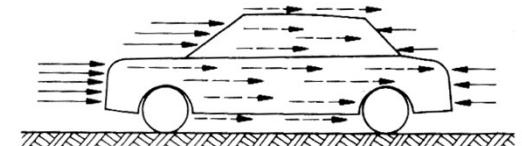
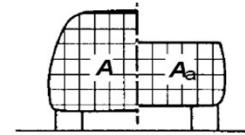
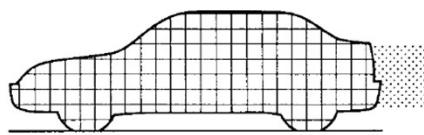
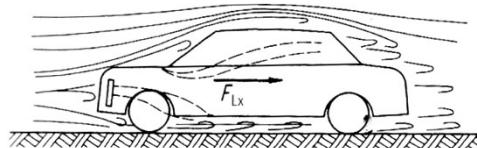
- Eksperimentalno – vazdušni tunel
- Modeliranjem – CFD



Computational Fluid Dynamics:

- Use laws of physics to derive the equations of motion of the air around or inside the car
- Solve these equations in time and space to calculate the flow variables (density, pressure, velocity, temperature) as functions of time and space
- Gives vast amount of data and details (izvor: S. Mihic)

IZRAČUNAVANJE OTPORA VAZDUHA - REZIME



Odvajanje graničnog sloja
→ površina izložena dejstvu
pritiska veća na prednjoj
nego na zadnjoj strani vozila

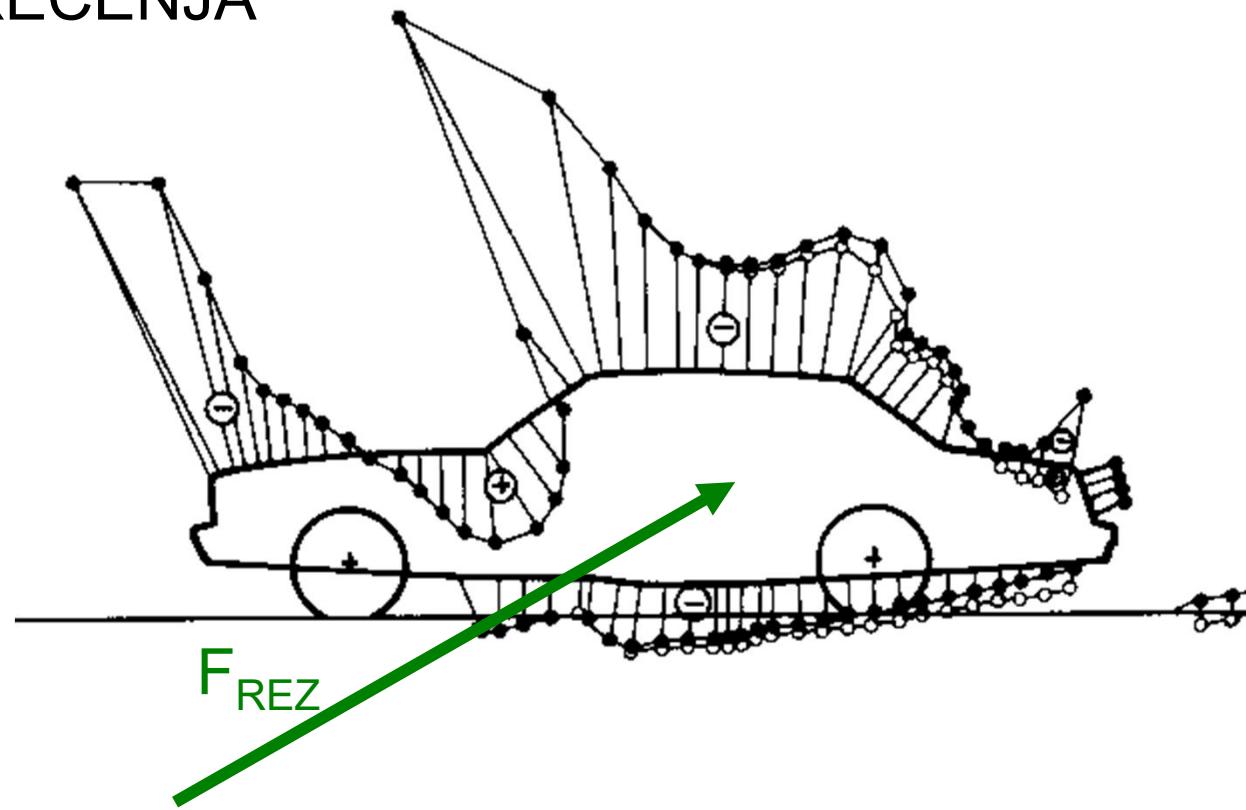
$$F \sim p \cdot \Delta A$$

Otporu vazduha u manjoj
meri doprinosi i trenje

Karakter strujanja zavisi od **oblika** vozila

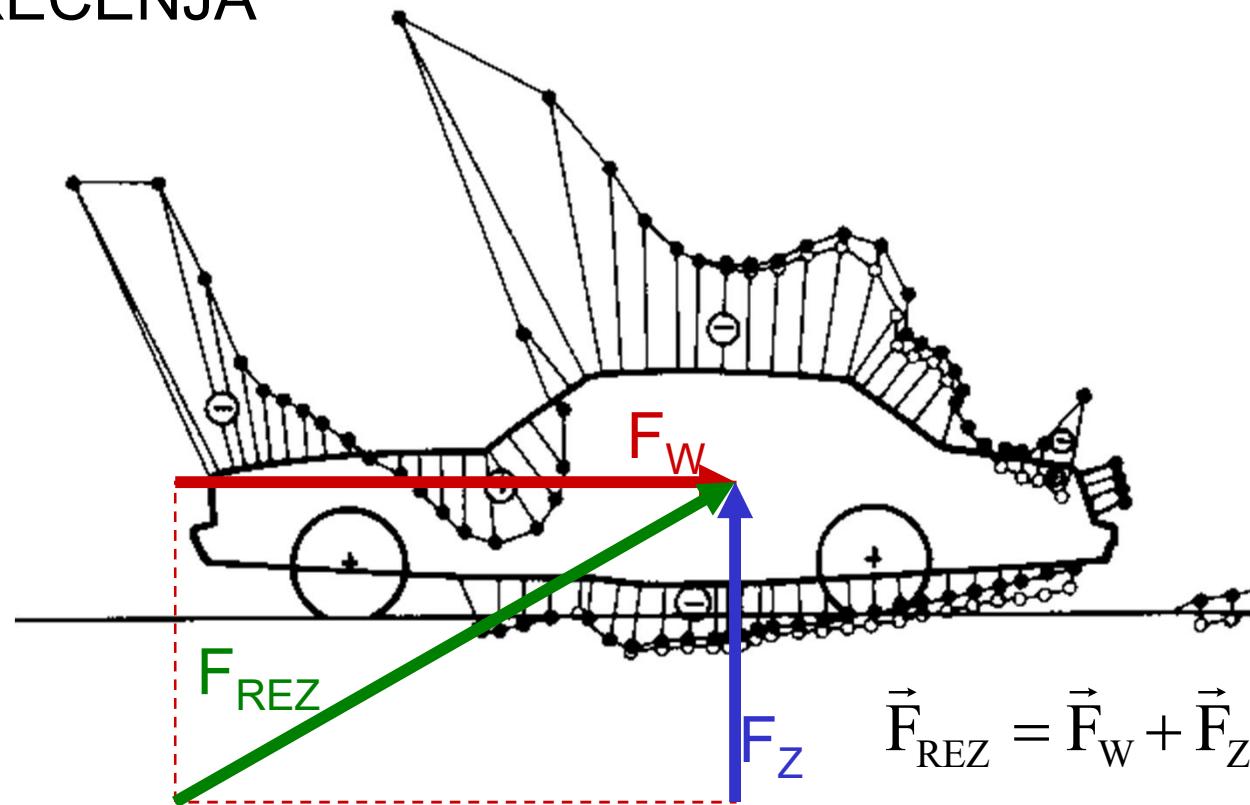
$$F_w = c_w \cdot A \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}$$

UTICAJ AERODINAMIČKIH SILA NA OSOVINSKA OPTEREĆENJA



Rezultujuća sila u opštem slučaju nije horizontalna!

UTICAJ AERODINAMIČKIH SILA NA OSOVINSKA OPTEREĆENJA



F_W – OTPOR VAZDUHA

F_z – IZDIZANJE VOZILA (\rightarrow smanjenje osovinskih opt.)

UTICAJ AERODINAMIČKIH SILA NA OSOVINSKA OPTEREĆENJA

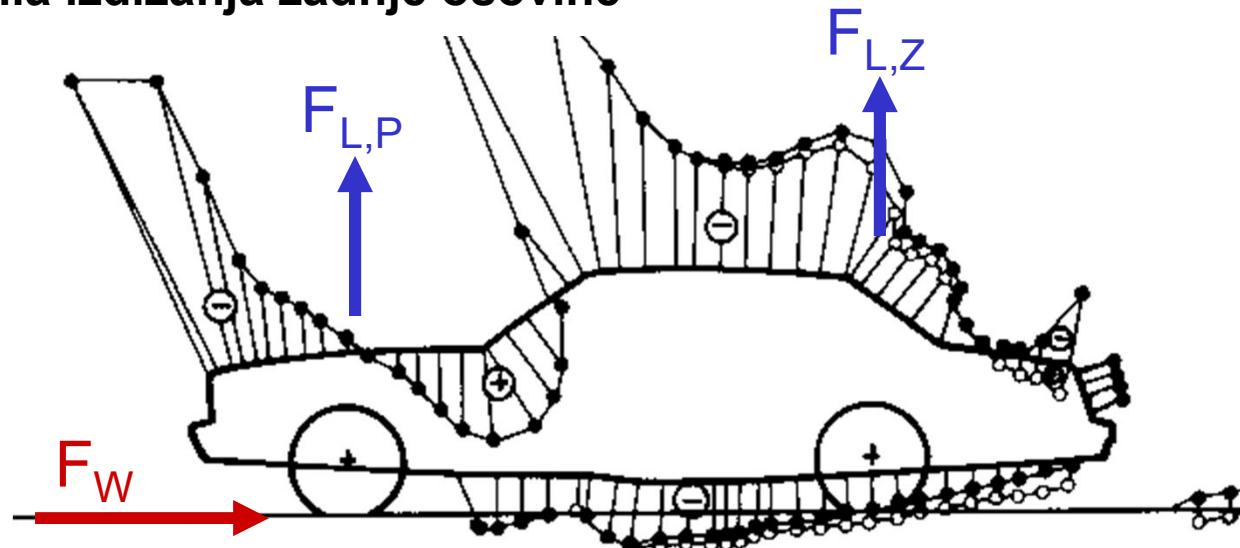
PRISTUP PRI ANALIZI AERODINAMIČKIH DEJSTAVA:

- **REDUKCIJA SILA NA NOVE NAPADNE LINIJE (ekvivalentno dejstvo!)**
- **UPOTREBA EKSPERIMENTALNIH KOEFICIJENATA** (poput c_w)

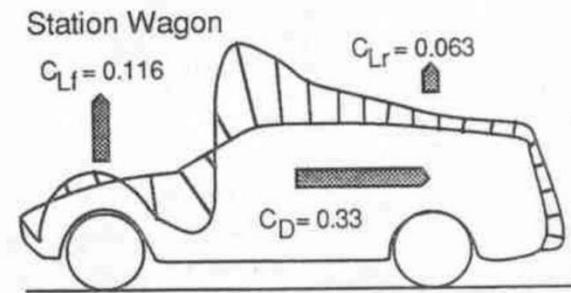
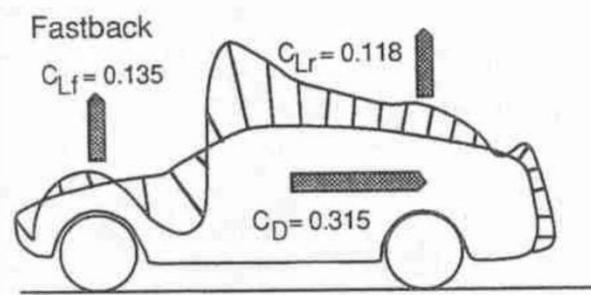
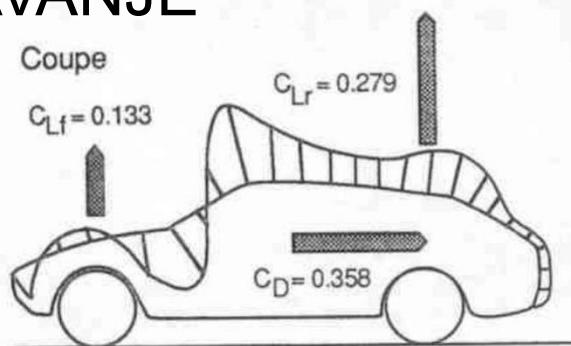
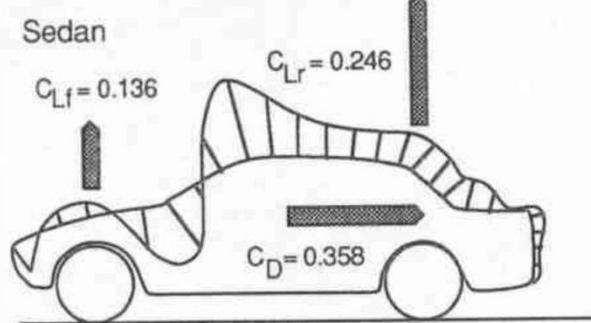
F_w – sila otpora vazduha

$F_{L,P}$ – sila izdizanja prednje osovine

$F_{L,Z}$ – sila izdizanja zadnje osovine



SILE IZDIZANJA - IZRAČUNAVANJE

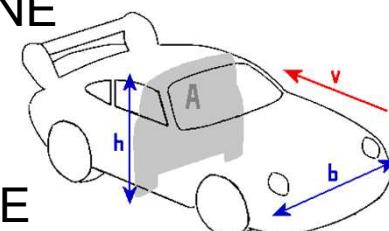


$$F_{LP} = c_{LP} \cdot A \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}$$

– SILA IZDIZANJA PREDNJE OSOVINE

$$F_{LZ} = c_{LZ} \cdot A \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}$$

– SILA IZDIZANJA ZADNJE OSOVINE



UTICAJ AERODINAMIČKIH SILA NA OSOVINSKA OPTEREĆENJA

Alternativno:

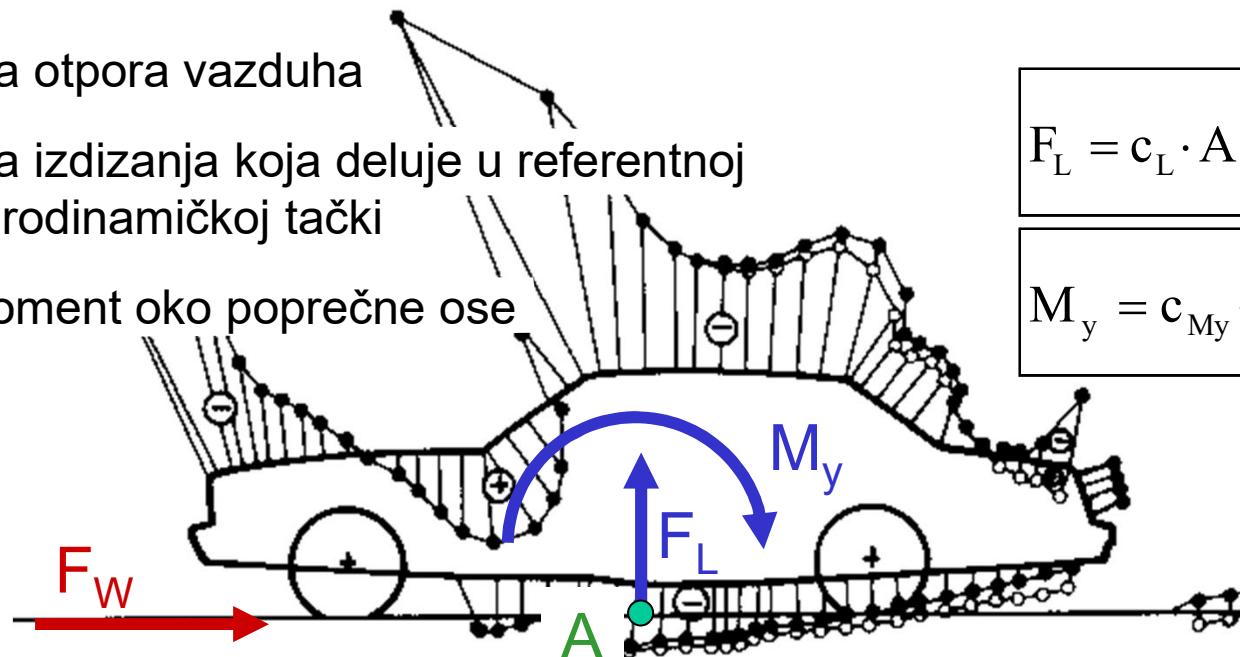
F_w – sila otpora vazduha

F_L – sila izdizanja koja deluje u referentnoj aerodinamičkoj tački

M_y – moment oko poprečne ose

$$F_L = c_L \cdot A \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}$$

$$M_y = c_{My} \cdot l_{REF} \cdot A \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}$$



A – referentna aerodinamička tačka

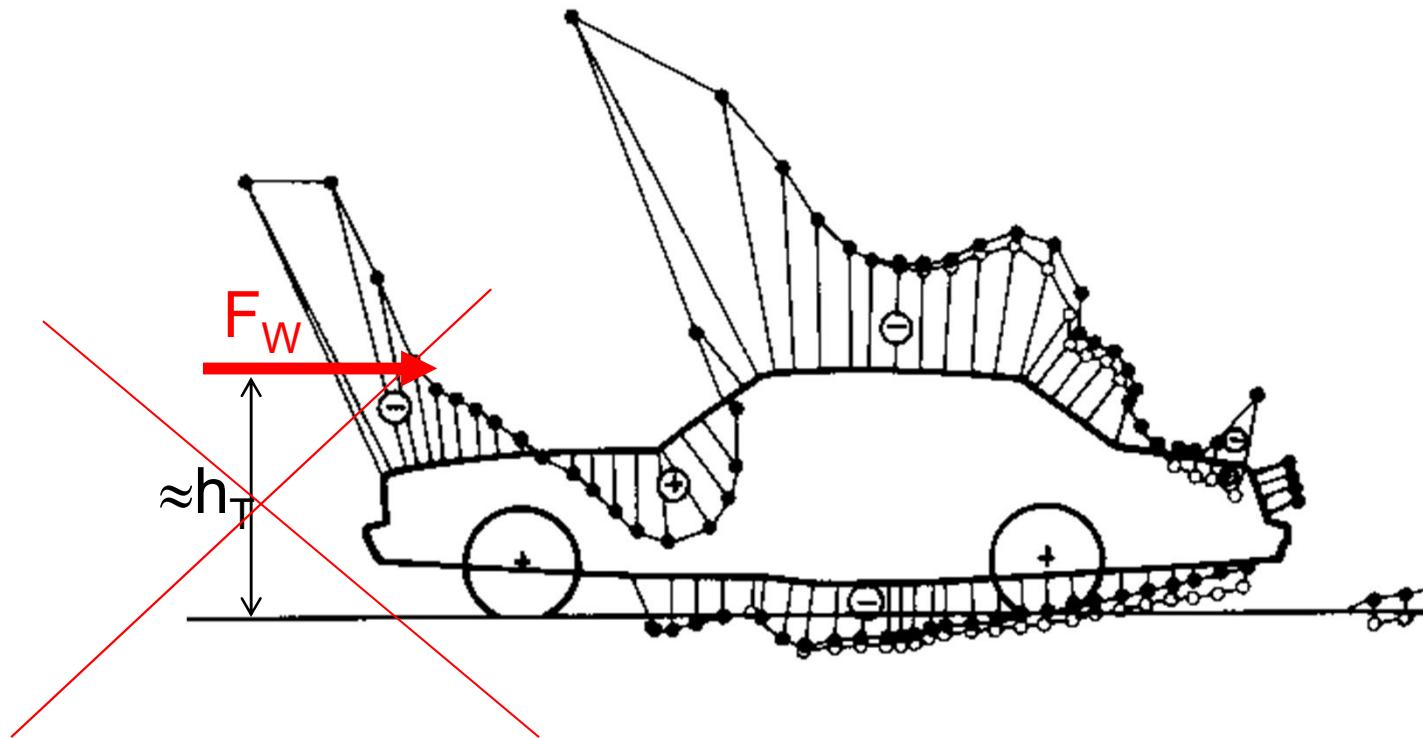
SAE konvencija:

A – središte osovinskog razmaka

l_{REF} – osovinski razmak

UTICAJ AERODINAMIČKIH SILA NA OSOVINSKA OPTEREĆENJA

Česta greška u literaturi!

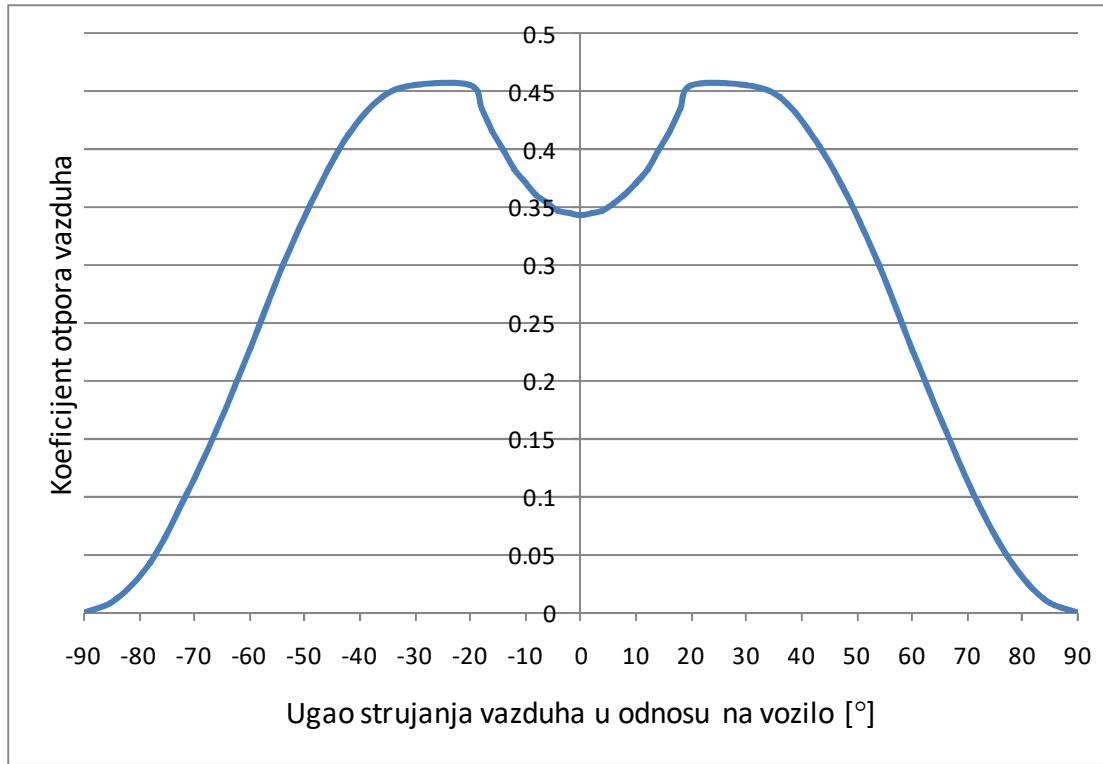


Greška je u zanemarivanju vertikalne komponente
rezultujuće aerodinamičke sile!

UTICAJ BOČNOG DEJSTVA AERODINAMIČKIH SILA

- Promena c_w pod dejstvom bočnog strujanja
- Uticaj bočne sile na stabilnost i upravljivost (povođenje točkova!)

Primer uticaja bočnog strujanja na c_w



Izvor podataka:
CarSim[®]
Mechanical Simulation