**SVEUČILIŠTE U SPLITU**

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE,**

**STROJARSTVA I BRODOGRANJE**

**SEMINARSKI RAD**

**CFD analiza predzemnog efekta (ground effect) - teoretske osnove i primjer**

**KOLEGIJI:**

**AEROTEHNIKA I VJETROTURBINE**

**Toni Škorlić**

Split, Studeni 2022.

# Uvod

*Ground effect* je fenomen koji se javlja kada zračna folija prolazi u blizini čvrste površine kao što je krilo zrakoplova. Prolaskom zračne folije blizu površine, zbog Bernoullijeva učinka, dolazi do povećanja tlaka zraka ispod krila. Ovakav, povećani tlak uzrokuje povećanje dizanja, omogućujući zračnom krilu da leti učinkovitije i manjom brzinom nego što bi to bilo da leti na većoj nadmorskoj visini. Ovaj učinak je najuočljiviji kada je zračna folija unutar nekoliko metara od tla. Povećano podizanje i učinkovitost leta predviđenog *ground effect*-om može se koristiti za smanjenje udaljenosti polijetanja i slijetanja, što može biti posebno korisno u manjim zrakoplovima koji često koriste kraće piste. Osim toga, *ground effect* može se koristiti i za povećanje upravljivosti, omogućujući zrakoplovu da brže napravi čvršće zavoje i okretanje. *Ground effect* također se može koristiti za smanjenje otpora, što može dovesti do poboljšane ekonomičnosti potrošnje goriva. Povećano podizanje i smanjenja otpora također se može koristiti za povećanje dometa zrakoplova, omogućujući mu da leti dalje na jednom spremniku goriva. Uz navedene prednosti *Ground effect-a* koje nastaju pravilnim korištenjem u obzir se moraju uzeti i opasne situacije koje mogu nastati ako dođe do zatajenja komponente koja funkcionira na ovaj princip. Osim u navedenoj, avionskoj industriji, učinak efekta se može uočiti i kod automobila kao smanjenje aerodinamičkog otpora kada je automobil blizu tla. Zbog Bernoullijeva učinka, brzina zraka se povećava,a tlak smanjuje. Držeći automobil blizu tla, zrak koji prolazi ispod automobila je veće brzine i stoga ima niži tlak, smanjujući otpor. Rezultat je poboljšana potrošnja goriva, povećano ubrzanje i poboljšano rukovanje. Razlog povećanja ekonomičnosti potrošnje goriva je zbog toga što automobil učinkovitije putuje zrakom. To se postiže smanjenjem ukupnog otpora na automobilu, jer zrak koji prolazi ispod automobila putuje brže i ima niži tlak od zraka koji prolazi preko automobila. Povećano ubrzanje zbog učinka na tlo također može biti korisno za automobile. Smanjenjem otpora, automobil je u stanju ubrzati brže, omogućujući mu brže postizanje većih brzina. Još jedna od prednosti *ground effect-a* u automobilima je poboljšano rukovanje. Imajući automobil bliže tlu, težište automobila je niže, što omogućuje stabilniju, responzivniju i okretniju vožnju. To je posebno korisno za automobile s performansama i trkaće automobile, jer poboljšano rukovanje može dovesti do bržeg vremena kruga.

# Principi koji opisuju *ground effect*

U *ground effect*-u, tlak zraka oko zrakoplova se smanjuje zbog toga što je zrak prisiljen prema dolje i komprimiran površinom. Površina koja komprimira zrak kako bi se stvorio navedeni fenomen je u avionskoj industriji najčešće krilo aviona. Ovo smanjenje tlaka zraka uzrokuje povećanje silu uzgona, omogućujući zrakoplovu da leti učinkovitije i s manje snage. Taj je učinak stvoren Bernoullijevim načelom, Coanda efektom, Venturi efektom i Magnusovim efektom. U sljedećim poglavljima će se detaljnije opisati navedena načela i efekti kako bi se pobliže opisali uzroci nastajanja fenomena.

## Bernulijevo načelo

Bernoullijevo načelo navodi da je pritisak na vrh aerodinamičke površine niži od pritiska na dno, stvarajući silu podizanja koja pomaže u podupiranju zrakoplova. Matematički prikaz ovog načela:

Gdje su:

* P1- Tlak na gornjoj površini
* P2- Tlak na donjoj površini
* ρ- Gustoća zraka
* V2-Brzina na površini
* g- Gravitacija
* h1-Visina gornje površine
* h2- Visina donje površine

Jednadžba navodi da je tlak na vrhu površine niži od tlaka na dnu površine, stvarajući silu podizanja.

Shape, rectangle

Description automatically generated

Slika 1. Prikaz Bernulijevog načela.[1]

## Coanda efekt

Coanda Efekt opisuje pojavu kada zračni tok teče preko zakrivljene površine i nastoji slijediti zakrivljenost površine, stvarajući područje niskog tlaka s donje strane površine koje pomaže u podupiranju zrakoplova. Ovaj efekt povećava sile uzgona,koja djeluje prema gore te smanjuje sile otpora, koje djeluju prema dolje i tako omogućavaju zrakoplovu da leti učinkovitije i s manje snage.

Gdje su:

* Fl - Potisna sila
* Ρ - Gustoća zraka
* v – Brzina zraka
* L – Duljina površine
* h – Visina površine

Diagram

Description automatically generated

Slika 2. Prikaz Coanda efekta.[2]

## Venturijev efekt

Venturi efekt je fenomen koji se javlja kada protok zraka prolazi kroz uski prolaz, kao što je cijev ili mlaznica. Kako zrak prolazi kroz uski prolaz, njegova brzina se povećava i tlak se smanjuje. Nastali diferencijal tlaka stvara učinak usisavanja, koji se može koristiti za povećanje podizanja zrakoplova kada je blizu tla. Ovaj fenomen poznat je kao *ground effect*. Učinak tla nastaje kada je zrakoplov dovoljno blizu tla da je sila zraka ispod krila prema dolje veća od sile prema gore koju stvaraju krila. To stvara jastuk zraka koji podržava zrakoplov i pojačava njegovo podizanje. Venturi efekt dodatno povećava podizanje stvaranjem vakuuma ispod krila. Vakuum povlači zrakoplov prema gore, što rezultira povećanom silom uzgona i poboljšanom stabilnošću. Osim toga, Venturi efekt smanjuje otpor, čineći zrakoplov učinkovitijim. *Ground effect* je najuočljiviji kada je zrakoplov blizu tla, ali se još uvijek može promatrati do nekoliko metara iznad tla. Učinak je najjači kada zrakoplov leti malim brzinama, primjerice tijekom polijetanja i slijetanja. Osim poboljšanja performansi zrakoplova, *ground effect* može se koristiti i za smanjenje razine buke prilikom polijetanja i slijetanja.

Matematički opis Venturijevog efekta je:

Gdje su:

* P1- statički tlak ispred Venturijeve cijevi,
* P2- statički tlak iza Venturijeve cijevi,
* ρ- gustoća zraka,
* v- brzina vjetra.

Diagram

Description automatically generated

Slika 3. Prikaz Venturijevog efekta.[3]

## Magnusov efekt

Magnusov učinak je fenomen koji se javlja kada se rotirajući objekt kreće kroz fluid. Rotirajući objekt stvara diferencijal tlaka s obje strane, što uzrokuje da sila djeluje okomito na smjer kretanja. Ova sila može se koristiti za povećanje sile uzgona kod zrakoplova kada je blizu tla, fenomen poznat kao *ground effect*.

Matematički opis Magnusevog efekta je:

Gdje su:

* FM- Magnusova sila,
* ρ- gustoća zraka,
* v- brzina vjetra,
* A- površina letjelice,
* Cl- koeficijent uzgona.

Diagram

Description automatically generated

Slika 4. Primjer Magnus efekta.[4]

# Computer fluid dynamics (CFD)

Dinamika računalnog fluida (CFD) je grana mehanike fluida koja koristi numeričke metode i algoritme za rješavanje i analizu problema koji uključuju protok tekućine. Koristi se za predviđanje protoka tekućine, prijenosa topline i mase, kemijskih reakcija i srodnih pojava. CFD se koristi u raznim inženjerskim disciplinama, uključujući zrakoplovnu, automobilsku, građevinsku i strojarsku, kao i u akademskim istraživanjima. CFD se također koristi za proučavanje ponašanja složenih fluidnih sustava, kao što su protok krvi u ljudskom tijelu, protok zraka u zrakoplovnim motorima i cirkulacija oceana na Zemlji. CFD se također može koristiti za proučavanje ponašanja tekućina u kemijskim postrojenjima za preradu, dizajna krila zrakoplova i performansi motora s unutarnjim izgaranjem. Najčešće korišteni turbulentni modeli za *ground effect* u CFD-u su modeli k-ω SST, k-ε i Spalart-Allmaras. K-ω SST model smatra se najtočnijim i najsnažnijim modelom za primjenu *ground effect*. K-ε model je model s dvije jednadžbe koji je manje računalno skup od k-ω SST modela, ali je nešto manje točan. Model Spalart-Allmaras je model s jednom jednadžbom koji je najmanje računalno “težak” i najmanje precizan od njih tri, ali može biti koristan za preliminarne simulacije.

U nastavku je opisan k-ω SST kao model koji će se koristiti.

## k-ω SST model turbulencije

K-ω SST (Shear Stress Transport) model je turbulentni model s dvije jednadžbe koji se koristi za simulaciju turbulentnih tokova. Model koristi dvije jednadžbe za opisivanje turbulentnog toka, k jednadžbu i ω jednadžbu. K jednadžba opisuje turbulentnu kinetičku energiju, dok ω jednadžba opisuje turbulentnu brzinu rasipanja. SST model kombinira k-ω i k-ε modele pomoću funkcije miješanja kako bi se osigurao glatki prijelaz između dva modela. K-ω SST model koristi dvije jednadžbe za opis turbulentnog toka:

k jednadžba:

ω jednadžba:

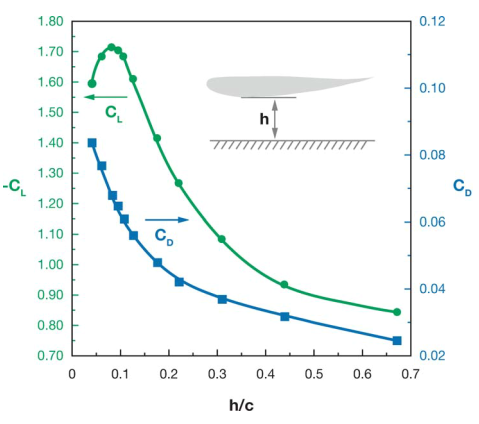
Ako su γk i γω stope proizvodnje i rasipanja stope. β1 i β2 su funkcije miješanja.

Rk i Rω su stopa proizvodnje i rasipanja turbulentne kinetičke energije.

Sk i Sω su izvorni pojmovi za k i ω jednadžbe.

# Pimjer utjecaja visine na koeficijente otpora i uzgona

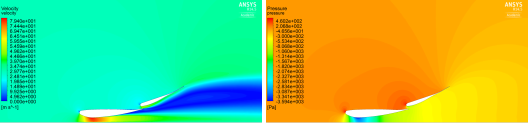
Visina je glavni faktor u određivanju koeficijenta otpora (CD) i koeficijenta uzgona (CL) aeroprofila. Što je veća visina aeroprofila, stvarat će više uzgona. Kako se visina povećava, tako se povećava i napadni kut aeroprofila, što rezultira povećanjem uzgona. Međutim, koeficijent otpora također raste s visinom, tako da je ukupna izvedba aeroprofila ravnoteža između uzgona i otpora. Kako se visina aeroprofila povećava, zrak koji struji preko aeroprofila mora putovati dalje, što povećava otpor. Iz tog razloga, aeroprofili s većim visinama obično imaju niže koeficijente otpora od onih s nižim visinama. Osim toga, koeficijent uzgona također raste s visinom, što može biti korisno za performanse zrakoplova. Na sljedećoj slici je prikazan utjecaj visine na koeficijente otpora i uzgona.



Slika 5. Prikaz utjecaja visine na koeficijente otpora i uzgona.[5]

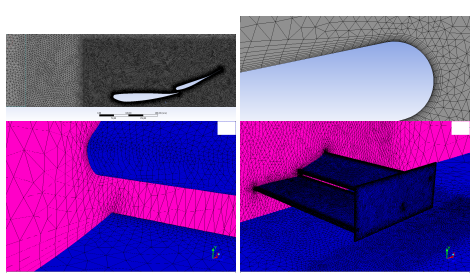
Ovo je primjer primjene CFD analize za simulaciju protoka i gdje je vidljiv utjecaj *ground effect*. Kao primjer primjene uzeto je dvo komponentno prednje krilo za formulu student, odnosno aeroprofil Eppler E423.

Odabran je ovaj aeroprofil iz razloga što ima dobre karakteristike kao i aeroprofil MSHD koji je projektiran izričito za natjecanja kao što je formula student, ali se zbog kompleksnosti izrade MSHD-a odabrao drugi aeroprofil Eppler E423 koji ima slične karakteristike (CL i CD) kao i MSHD.. Na slici 6, gdje je prikazana brzina zraka oko dvo komponentnog aeroprofila, može se uočiti da dolazi do povećanja brzine između aertoprofila i podloge. S obzirom na to da porast brzine prati pad tlaka na lijevoj slici koja prikazuje promjenu tlaka uočava se pad tlaka. Područje nižeg tlaka označava da fluid ima višu brzinu te je vidljivo da sila uzgona djeluje na mjestu najnižeg tlaka.



Slika 6. Prikaz kotura brzine i tlaka za dvo komponentni aeroprofil [6].

Na slici 7 prikazani su 2D I 3D mesh za simulaciju prednjeg krila u CFD-u.



Slika 7. Prikaz 2D i 3D mreže za simulaciju dvo komponentnog aeroprofila.[7]

# Zaključak

*Ground effect* je fenomen koji je zbog svojih brojnih prednosti predmet dugotrajnih istraživanja. Korištenjem Bernoullijevog načela, Coanda, Venturi i Magnusovog efekta u potpunosti je objašnjen ovaj fenomen. Razvojem CFD analize i razvojem različitih metoda turbulencija, među kojima je za optimizaciju oblika i preformansi aviona najtočnija k omega SST model turbulencije, omogućena je analiza utjecaja tla kojom se vizualno najlakše uočava promjena brzine i tlaka. Povećanje brzine prati pad tlaka, pri kojem se dobiva najveća sila uzgona. Provedenom simulacijom na dvo komponentom krilu u radu je prikazana promijena brzine i tlaka. CFD analiza se provodi prilikom dizajna zrakoplova kako bi se povećala sila uzgona, odnosno smanjila sila otpori na taj način dobilo optimalni oblik i performanse samog zrakoplova.

# Referenca

[1]-<https://www.google.com/search?q=bernoullijev+efekt&sxsrf=ALiCzsYxpIHTsC1SfujFo5uf5EdiHRyNqw:1670698915620&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjtkZG73u_7AhW_7rsIHbKnBaYQ_AUoAXoECAIQAw&biw=871&bih=879&dpr=1.1#imgrc=_93IoC-sQxBawM>

[2]- <https://www.google.com/search?q=coanda+efekt&tbm=isch&ved=2ahUKEwieyPy73u_7AhUpiP0HHYRmAeAQ2-cCegQIABAA&oq=coanda+efekt&gs_lcp=CgNpbWcQAzIECAAQHjoHCAAQgAQQGDoECCMQJzoLCAAQgAQQsQMQgwE6BAgAEAM6BQgAEIAEOggIABCABBCxAzoICAAQsQMQgwE6BAgAEEM6BggAEAgQHlC2B1iME2CUFWgAcAB4AIABdIgB9gmSAQQxMC4zmAEAoAEBqgELZ3dzLXdpei1pbWfAAQE&sclient=img&ei=pdeUY97hFqmQ9u8PhM2FgA4&bih=879&biw=871#imgrc=evcESWqY0WLERM>

[3]- <https://www.google.com/search?q=bernoullijev+efekt&tbm=isch&chips=q:bernoullijev+efekt,online_chips:bernoullijeva+jednad%C5%BEba+kontinuiteta:GB0CjQ_dq-8%3D&hl=hr&sa=X&ved=2ahUKEwieyPy73u_7AhUpiP0HHYRmAeAQ4lYoAnoECAEQKQ&biw=855&bih=864#imgrc=76vdD40CHRijvM>

[4]- <https://www.google.com/search?q=magnusov+efekt+football&tbm=isch&ved=2ahUKEwj4wvqC3-_7AhXTwAIHHcJ1D0gQ2-cCegQIABAA&oq=magnusov+efekt+football&gs_lcp=CgNpbWcQAzoECCMQJzoECAAQHlCuBVjbE2C6FWgAcAB4AIABYIgBkweSAQIxMJgBAKABAaoBC2d3cy13aXotaW1nwAEB&sclient=img&ei=OtiUY_i9DtOBi-gPwuu9wAQ&bih=864&biw=855&hl=hr#imgrc=0bAu61yFE4WxWM>

[5]- <https://www.google.com/search?q=drag+and+lift+coefficient+vs+h&tbm=isch&ved=2ahUKEwiLjPKh3-_7AhUsxwIHHWUpDywQ2-cCegQIABAA&oq=drag+and+lift+coefficient+vs+h&gs_lcp=CgNpbWcQAzIECCMQJ1AAWH9gzwJoAHAAeACAAVuIAa4BkgEBMpgBAKABAaoBC2d3cy13aXotaW1nwAEB&sclient=img&ei=e9iUY8viBqyOi-gP5dK84AI&bih=864&biw=855&hl=hr#imgrc=Auk6IFNiRDAumM>

[6]-Aerodynamic development of Formula Student race cars. Hendrik Dahlberg.