

Numerička simulacija optjecanja aeroprofila s upravljanom cirkulacijom

Batistić, I.¹, Cukrov, A.² i Tuković, Ž.³

Sažetak

Cilj ovog rada je pokazati mogućnosti primjene OpenFOAM C++ biblioteke za numeričku mehaniku kontinuuma kod proračuna optjecanja aeroprofila s upravljanom cirkulacijom. Upravljanje cirkulacijom podrazumijeva povećanje sile uzgona pomicanjem točke odvajanja strujanja prema području krajnje točke aeroprofila. Ovo povećanje uzgonske sile se ostvaruje tangencijalnim upuhivanjem zraka u granični sloj na gornjoj površini profila. Metodom kontrolnih volumena su numerički riješene jednačbe očuvanja mase i količine gibanja za turbulentno nestlačivo strujanje. Skup jednačbi je zatvoren $k-\omega$ SST modelom turbulencije. Izvršeni su proračuni s tri numeričke mreže različitih rezolucija. Dobiveni rezultati se dobro slažu s rezultatima eksperimentalnih ispitivanja, te rezultatima proračuna kod kojih je primijenjena metoda simulacije velikih vrtloga.

Ključne riječi: turbulentno optjecanje aeroprofila, metoda kontrolnih volumena, OpenFOAM, sila uzgona, točka odvajanja

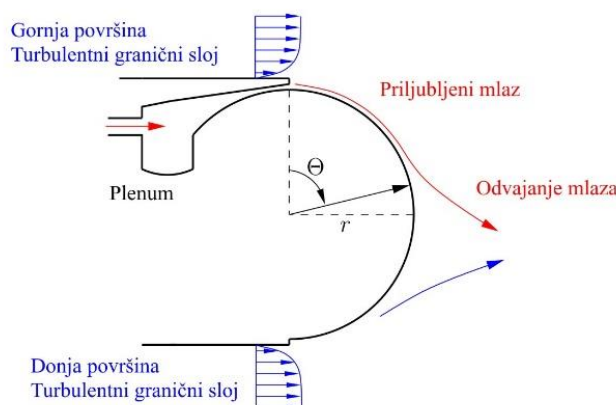
¹ **Ivan Batistić, bacc. ing. mech.**, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Ivana Lučića 5, 10000 Zagreb, e-mail: ivan.batistic2@gmail.com

² **Alen Cukrov, mag. ing. mech.**, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zavod za termodinamiku, toplinsku i procesnu tehniku, Ivana Lučića 5, 10000 Zagreb, e-mail: alen.cukrov@fsb.hr

³ **Prof. dr. sc. Željko Tuković, dipl. ing. stroj.**, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zavod za energetska postrojenja, energetiku i ekologiju, Ivana Lučića 5, 10000 Zagreb, e-mail: zeljko.tukovic@fsb.hr

1 Uvod

Postizanje što većih vrijednosti sile uzgona prilikom optjecanja aeroprofila ima izrazit značaj u zrakoplovstvu. Kod polijetanja i slijetanja je potrebno postići što veću silu uzgona uz što manju brzinu zrakoplova. Jedan od načina na koji se može povećati silu uzgona jest upuhivanjem mlaza zraka na području stražnjeg brida aeroprofila kao što je prikazano na Slici 1. Takvim tangencijalnim upuhivanjem struje zraka, uz površinu profila se formira priljubljeni mlaz (Coanda efekt), te se točka odvajanja strujanja pomiče prema području krajnje točke aeroprofila. Pomicanje točke odvajanja rezultira većim iznosom sile uzgona.



Slika 1. Grafički prikaz strujanja priljubljenog mlaza uz površinu aeroprofila

Standardni inženjerski pristup numeričkog modeliranja turbulentnog nestlačivog strujanja rješavanjem vremenski osrednjenih Navier-Stokesovih jednadžbi (*engl.* Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS), nailazi na poteškoće kod predviđanja mjesta na kojem dolazi do odvajanja mlaza pri višim brzinama strujanja mlaza.

Cilj ovog rada je pokazati mogućnosti OpenFOAM C++ biblioteke kod proračuna optjecanja aeroprofila uz prisutno upuhivanje mlaza zraka u granični sloj na stražnjem bridu.

Rad je podijeljen na četiri poglavlja. Nakon Uvoda, u drugom poglavlju izneseni su detalji vezani uz izrađeni numerički model kojim je riješen opisani problem. Dobiveni rezultati dani su u trećem poglavlju. Na kraju rada je dan zaključak zajedno s preporukama za daljnji rad.

2 Numerički model

2.1 Matematički model i model turbulencije

Analizirano izotermno turbulentno nestlačivo strujanje opisano je vremenski osrednjenim Navier-Stokesovim jednadžbama (tzv. Reynoldsovim jednadžbama), koje predstavljaju dva zakona klasične fizike:

- zakon očuvanja mase

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

- zakon očuvanja količine gibanja

$$\nabla \cdot (\mathbf{v}\mathbf{v}) = \nabla \cdot [(\nu + \nu_t)\nabla \mathbf{v}] - \nabla p \quad (2)$$

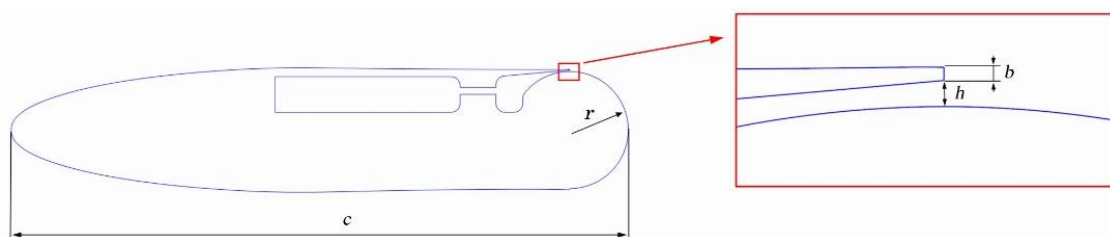
gdje $\mathbf{v}$ označava vremenski osrednjeno polje brzine, p polje tlaka, a zbroj $(\nu + \nu_t)$ efektivnu viskoznost, sastavljenu od molekularne viskoznosti ν i turbulentne viskoznosti ν_t . S obzirom da u skupu jednažbi (1)-(2) broj jednažbi nadmašuje broj nepoznatih polja, sustav se zatvara uvođenjem k - ω SST modela turbulencije sa standardnim koeficijentima, čijim rješavanjem se dobiva turbulentna viskoznost ν_t .

2.3 Diskretizacija sustava jednažbi

Sustav parcijalnih diferencijalnih jednažbi kojima je opisan analizirani problem, diskretiziran je metodom kontrolnih volumena (MKV). Za rješavanje jednažbe očuvanja mase i jednažbi količine gibanja primijenjena je linearno uzvodna shema (*engl.* second order upwind), dok je za transportne jednažbe turbulentnih veličina korištena uzvodna shema diferencije (*engl.* first order upwind). Polje tlaka, čije poznavanje je nužno za rješavanje jednažbi količine gibanja, a nije opisano vlastitom transportnom jednažbom, povezano je s poljem brzine koristeći algoritam SIMPLE (*engl.* Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations).

2.4 Diskretizacija prostora proračuna i rubni uvjeti

Proračunska domena izvedena je kao dvodimenzionalna. Geometrija analiziranog aeroprofila prikazana je na Slici 2. Konstrukciju i ispitivanje predmetnog aeroprofila je provela istraživačka grupa na Georgia Tech Research Institute (GTRI) (2). Također, u (3) autori su proveli mjerenja na zadanom profilu. Aeroprofil karakterizira prednji brid eliptičnog oblika, te cilindrična izvedba stražnjeg brida. Upuhivanje zraka u svrhu povećanja sile uzgona, odvija se jedino na gornjoj strani profila. Duljina tetive c iznosi 218,3 mm, a polumjer stražnjeg brida je 20,66 mm ($0,09463c$). Istrujni otvor ima visinu h u iznosu 0,503 mm ($0,02433r$), te se nalazi na dubini b ispod gornje površine profila koja iznosi 0,254 mm ($0,01229r$). Geometrija aeroprofila je preuzeta sa stranice američke svemirske agencije NASA (4).



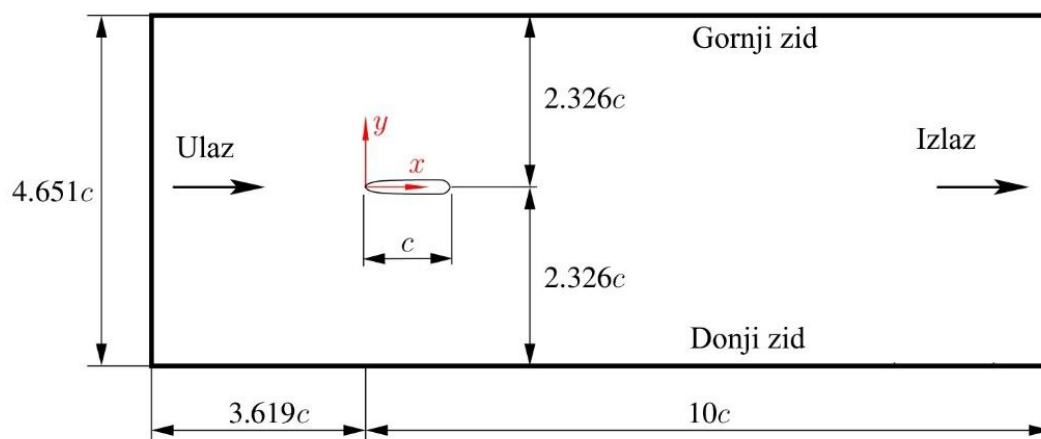
Slika 2. Geometrija analiziranog aeroprofila s upravljanoj cirkulacijom

Na Slici 3 prikazana je proračunska domena. Na površini aeroprofila, jednako kao i na stjenkama plenuma i mlaznice, komponente brzine strujanja postavljene su na nulu (*engl.* no-slip condition). S druge strane, na gornjem i donjem zidu domene je pretpostavljeno nepostojanje trenja (*engl.* slip condition). Na ulazu u domenu zadan je uniforman profil brzine $U_\infty = 34$ m/s. Napadni kut u analiziranom slučaju je jednak nuli, jer vektor brzine leži na pravcu koji je paralelan osi simetrije profila. Nadalje, na ulaznoj granici komore koja prethodi plenumu, zadana je uniformna brzina $U = 4,203$ m/s. Time je postignut maseni protok zraka koji je korišten u eksperimentu, $m_f = 0,0636$ kg/(m s). Koeficijent količine gibanja mlaza glasi:

$$C_\mu = \frac{m_f U_{j,sr}}{q_{ref} A} \quad (3)$$

gdje je m_f maseni protok mlaza, a $U_{j,sr}$ je srednja istrujna brzina mlaza. Koeficijent količine gibanja mlaza u ovoj studiji iznosi približno 0,044 dok Machov broj na izlazu iz mlaznice ima vrijednost 0,39. Iako nestlačivo strujanje podrazumijeva Machov broj niži od 0,3, može se primijeniti numerički rješavač za nestlačivo strujanje jer je područje višeg Machovog broja malo, te ne utječe značajno na dobivena rješenja (1). Na izlazu iz domene je zadan tlak u obliku $p/p_{ref} = 1$. Uvažavajući brzinu na ulazu u domenu U_∞ i duljinu tetive c , dobiva se Reynoldsov broj u iznosu 488.992. Reynoldsov broj za strujanje mlaza je definiran kao $U_{j,max}h/\nu$, te iznosi 4500.

U eksperimentu (3) i proračunu (5), u kojem je primijenjena metoda simulacije velikih vrtloga (*engl.* Large Eddy Simulation, LES), je dodana valovita traka u blizini prednjeg brida. Ta traka je u dvodimenzionalnom prikazu predstavljena kao pravokutno ispupčenje. Proračuni metodom simulacije velikih vrtloga (5) pokazuju kako granični sloj s donje strane profila ne postaje potpuno turbulentan do duljine $x/c = 0,4$ (valovita traka se nalazi na $x/c = 0,021$). Time je ustanovljeno kako dodavanje trake ne ostvaruje željeni učin, te je stoga izuzeta iz ove studije. Rezultati dobiveni rješavanjem Reynoldsovih jednačbi (1), pokazali su pojavu prijelaznog područja na duljini $x/c = 0,1$. Također, u (1) istraživači su ustvrdili kako postizanje prijelaznog područja na istom mjestu na kojem se ono dobiva metodom simulacije velikih vrtloga, nema značajnog utjecaja na dobivena rješenja.

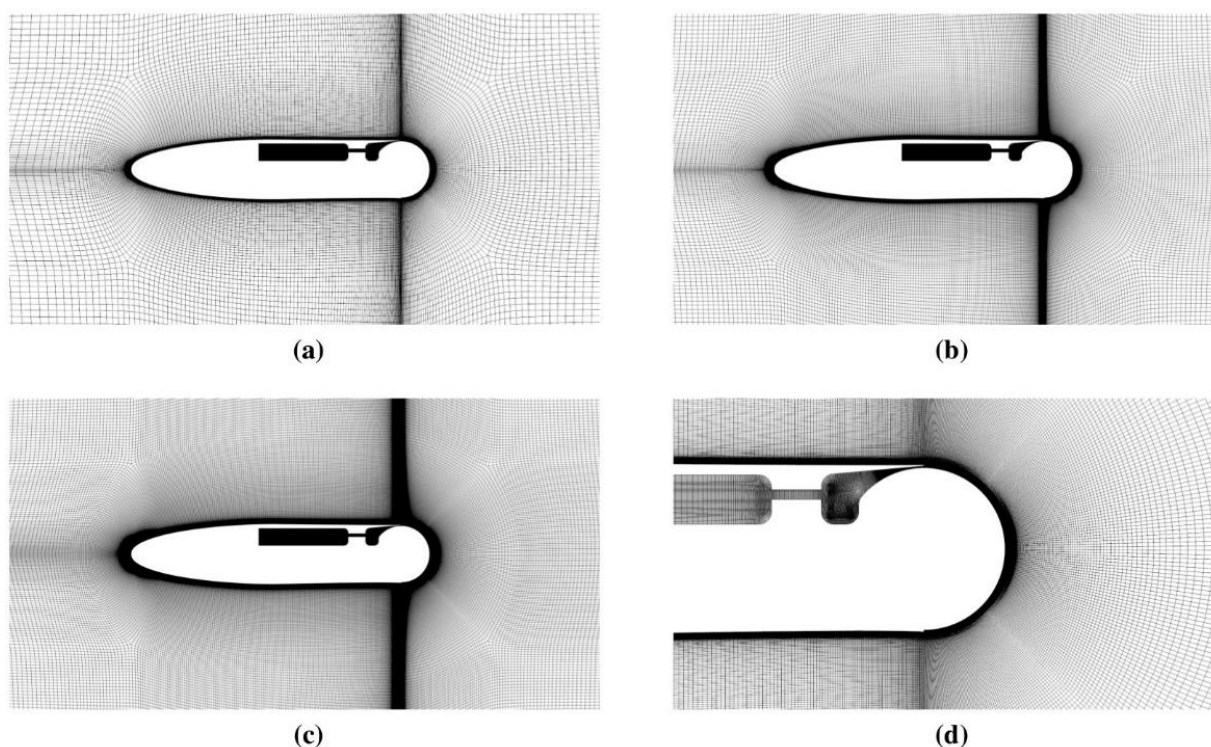


Slika 3. Proračunska domena

Slika 4 prikazuje generiranu numeričku mrežu u blizini aeroprofila. Mreža je izrađena koristeći računalni program Pointwise (7), te se sastoji od heksaedarskih kontrolnih volumena (ćelija). Izrađene su tri mreže različitih gustoća raspodjele kontrolnih volumena: gruba (73.190 ćelija), srednja (156.699 ćelija), te fina (276.490 ćelija). Mreža u blizini zidova ima raspodjelu ćelija potrebnu za proračun viskoznog podsloja na finoj mreži. Kod srednje i grube mreže je zabilježeno kako neka područja imaju vrijednosti y^+ veće od preporučenih.

3 Rezultati

Numerički dobivene vrijednosti koeficijenata uzgona se dobro slažu s rezultatima istraživača koji su primijenili metodu simulacije velikih vrtloga (Tablica 1). Također, prijavljeno je prihvatljivo predviđanje vrijednosti kuta odvajanja strujanja (kut θ na Slici 1).



Slika 4. Mreže kontrolnih volumena koje su korištene za proračun: (a) gruba, (b) srednja i (c) fina mreža. Detaljniji prikaz diskretizacije prostora u blizini stražnjeg brida na finoj mreži (d).

Vrijednosti koeficijenta tlaka pokazuju dobro slaganje s eksperimentalnim rezultatima po cijeloj dužini aeroprofila (Slika 5a). Na području priljubljenog mlaza, najbolja slaganja s eksperimentalnim rezultatima i rezultatima dobivenim metodom simulacije velikih vrtloga su ostvarena sa srednjom i finom mrežom (Slika 5b).

Tablica 1. Usporedba dobivenih karakteristika priljubljenog mlaza s rezultatima dobivenim pomoću metode simulacije velikih vrtloga

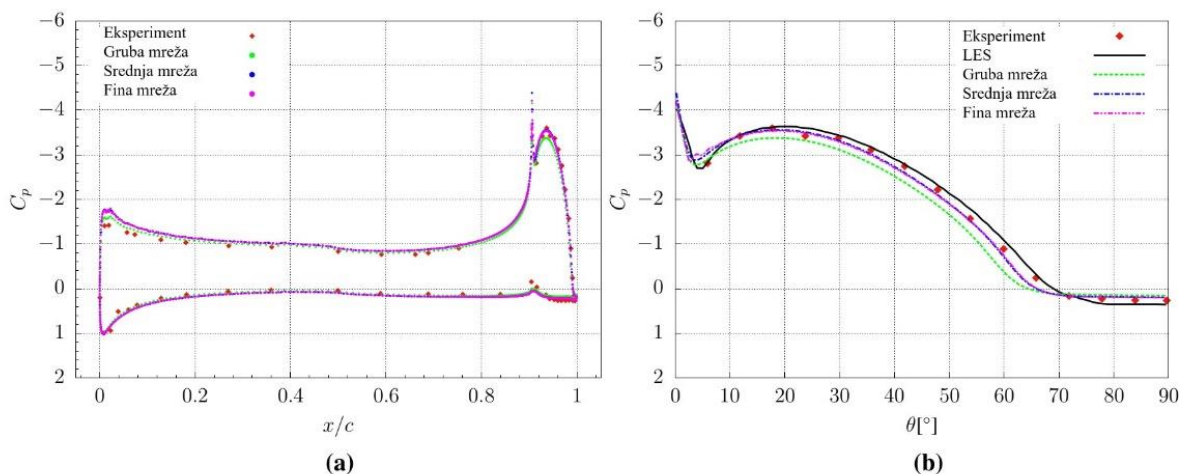
	$U_{j,max}$	Θ_{sep} [°]	x_{rec}/c	x_{stag}/c	C_L		
					Gruba mreža	Srednja mreža	Fina mreža
OpenFOAM	131,47	62,0	1,089	0,0075	1,347	1,453	1,446
LES (5),(6)	134,5	67	1,060	0,0055	1,36		

$U_{j,max}$ – maksimalna brzina mlaza na izlazu iz mlaznice; x_{rec}/c – udaljenost na kojoj završava recirkulacijska zona; x_{stag}/c – položaj prednje zaustavne točke; C_L – koeficijent uzgona

4 Zaključak

Provedena numerička studija pokazuje učinkovitost primjene C++ biblioteke OpenFOAM za proračune optjecanja aeroprofila s kontroliranom cirkulacijom. Metodom kontrolnih volumena su numerički riješene Reynoldsove jednadžbe, te su dobivene vrijednosti kuta odvajanja mlaza od stjenke profila, kao i koeficijenta tlaka i uzgona. Prijavljeno je dobro slaganje s

eksperimentalnim rezultatima i rezultatima drugih istraživača koji su primijenili metodu simulacije velikih vrtloga.



Slika 5. Koeficijent tlaka po dužini aeroprofila (a), te u zoni priljubljenog mlaza (b)

Analizirani fenomen ima velik potencijal za primjenu u turbostrojevima. Ubrizgavanjem fluida na izlaznom bridu statorskih lopatica moguće je upravljati kutem apsolutnog toka na ulazu u rotorsku rešetku i na taj način povećati iskoristivost turbostroja u vanprojektnim režimima rada. Ovaj rad čini temelj za razvoj numeričke metode prikladne za takve proračune.

Literatura

1. Rumsey C L i Nishino T. Numerical study comparing RANS and LES approaches on a circulation control airfoil. *Int. Journal of Heat and Fluid Flow*, 2011;32:847-864.
2. Englar R J, Jones G S, Allan B G i Lin J C. 2-D circulation control airfoil benchmark experiments intended for CFD code validation. 47th AIAA Paper. 2009;902.
3. Jones G S, Lin J C, Allan B G, Milholen W E, Rumsey C L i Swanson R. Overview of CFD Validation Experiments for Circulation Control Applications at NASA. NASA Scientific and Technical Information Branch, 2009.
4. Langley Research Center., Turbulence modeling resource, pristupljeno: 02.10.2017, https://turbmodels.larc.nasa.gov/Other_LES_Data/coanda_airfoil.html, posljednji put ažurirano: 24.01.2014.
5. Nishino T, Hahn S i Shariff K. Large-eddy simulations of a turbulent coanda jet on a circulation control airfoil. *Physics of fluids* 2010;22(12).
6. Nishino T, Hahn S i Shariff K. LES of high-Reynolds-number Coanda flow separating from a rounded trailing edge of a circulation control airfoil. 8th International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements, 2010.
7. Pointwise, <http://www.pointwise.com/>.