

# NUMERIČNE METODE V DINAMIKI FLUIDOV

## UČNI NAČRT PREDMETA/COURSE SYLLABUS

<b>Predmet:</b>	NUMERIČNE METODE V DINAMIKI FLUIDOV
<b>Course title:</b>	COMPUTATIONAL METHODS FOR FLUID DYNAMICS
<b>Članica nosilka/UL Member:</b>	UL FS

<b>Študijski programi in stopnja</b>	<b>Študijska smer</b>	<b>Letnik</b>	<b>Semestri</b>	<b>Izbirnost</b>
--------------------------------------	-----------------------	---------------	-----------------	------------------

Strojništvo, tretja stopnja, doktorski	Ni členitve (študijski program)	1. letnik, 2. letnik	Celoletni	izbirni
--	---------------------------------	----------------------	-----------	---------

**Univerzitetna koda predmeta/University course code:**

0033419

**Koda učne enote na članici/UL Member course code:**

7011

<b>Predavanja /Lectures</b>	<b>Seminar /Seminar</b>	<b>Vaje /Tutorial s</b>	<b>Klinične vaje /Clinical tutorials</b>	<b>Druge oblike študija /Other forms of study</b>	<b>Samostojno delo /Individual student work</b>	<b>ECTS</b>
90					160	10

**Nosilec predmeta/Lecturer:**

Božidar Šarler

**Izvajalci predavanj:**

Božidar Šarler

**Izvajalci seminarjev:**

**Izvajalci vaj:**

**Izvajalci kliničnih vaj:**

**Izvajalci drugih oblik:**

**Izvajalci praktičnega usposabljanja:**

**Vrsta predmeta/Course type:**

Izbirni predmet /Elective course

**Jeziki/Languages:**

Predavanja/Lectures:

Angleščina, Slovenščina

Vaje/Tutorial:

Angleščina, Slovenščina

**Pogoji za vključitev v delo oz. za opravljanje študijskih obveznosti:****Prerequisites:**

Veljajo splošni pogoji za doktorski študij.

General prerequisites for the third level studies.

**Vsebina:****Content (Syllabus outline):**

Uvod: Namen predmeta in njegove zahteve. Kratka zgodovina računskih metod za izračun toka tekočine. Sodobni primeri uporabe.

Matematični opis fizikalnih pojavov, povezanih s tokom tekočine in pripadajoče parcialne diferencialne enačbe (PDE). Predpostavke in fizikalne omejitve Navier-Stokesove (NS) enačbe. Tipi PDE in metoda karakteristik; narava koordinat.

Diskretizacijske metode: metoda končnih razlik in metoda končnih volumnov. Primerjava z drugimi metodami diskretizacije. Časovna diskretizacija: implicitne in eksplicitne metode. Omejitve numeričnega reševanja PDE: red natančnosti, zaokrožitvena napaka, konvergenca, numerična stabilnost (von Neumannova analiza stabilnosti), numerična difuzija in disperzija. Implementacija robnih in začetnih pogojev.

Geometrijski problemi diskretizacije; različni tipi računskih mrež: strukturirane in nestrukturirane mreže.

Reševanje NS enačbe: sklopitev tlačnega in hitrostnega polja. Premaknjene in nepremaknjene (kolocirane) računske mreže. Razlike pri obravnavi nestisljive in stisljive tekočine.

Modeliranje turbulence: izvedljivost direktne numerične simulacije (DNS). Reynoldsovo povprečevanje in

Introduction: Objectives of the course and requirements. Brief history of computational methods for fluid flow simulations. Examples of CFD cases of today.

Mathematical description of physical phenomena related to fluid flow with corresponding partial differential equations (PDE). Assumptions and limitations of the Navier-Stokes (NS) equation. The classification of PDE, the method of characteristics; the nature of coordinates.

Discretization methods. The finite difference and the finite volume methods; comparison with other discretization methods. Discretization of time: implicit and explicit methods. Limitations of discretization: order of accuracy, round-off error, convergence, numerical stability (von Neumann analysis), numerical diffusion and dispersion. The implementation of boundary and initial conditions.

Geometrical problems of discretization. Different types of computational grids: structured and unstructured grids.

Solving the NS equation: coupling of pressure and velocity field. Staggered and collocated grids. Differences when dealing with compressible and incompressible fluid.

Modelling the turbulence: feasibility of the direct numerical simulation (DNS).

<p>Reynoldsov napetostni tenzor. Modeliranje turbulentne viskoznosti (Bousinesqov približek). Algebrajski, enoenačbni in dvoenačbni modeli. Model k-<math>\epsilon</math>. Robni pogoji pri turbulentnih modelih, ki sledijo iz teorije robne plasti. Turbulentni modeli za nižje vrednosti Reynoldsovega števila. Principi bolj naprednih modelov (npr. RSM in LES).</p> <p>Validacija in verifikacija izračunanih rezultatov.</p> <p>Predlogi in pogovor o seminarskih nalogah, ki jih bodo izdelali slušatelji.</p>	<p>Reynolds averaging and Reynolds stress tensor. Modelling of eddy viscosity (Boussinesq approximation). Algebraic, one-equation and two-equation models. The k-<math>\epsilon</math> model. Boundary conditions for turbulent models based on the boundary layer theory. Low Reynolds number (LRN) models. Principles of more advanced turbulent models (e.g. RSM and LES).</p> <p>Validation and verification of calculated results.</p> <p>Discussion of student's individual work.</p>
--	---

### Temeljna literatura in viri/Readings:

- [1] J.H. Ferziger, M. Perić: Computational Methods for Fluid Dynamics, 3rd Edition, Springer-Verlag, 2002. COBISS.SI-ID - 40359173, COBISS.SI-ID - 5023771, COBISS.SI-ID - 2530075, COBISS.SI-ID - 20391685
- [2] S.V. Patankar: Numerical heat transfer and fluid flow, Hemisphere Publishing Corp., 1980. COBISS.SI-ID - 162843
- [3] H.K. Versteeg, W. Malalasekera: An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method, Longman Scientific & Technical, 1995. COBISS.SI-ID - 28914181, COBISS.SI-ID - 1260059
- [4] C.A.J. Fletcher, Computational Techniques for Fluid Dynamics 1, Fundamental and General Techniques, Springer-Verlag, 1988. (izbrana poglavja) COBISS.SI-ID - 30309889
- [5] C.A.J. Fletcher, Computational Techniques for Fluid Dynamics 2, Specific Techniques for Different Flow Categories, Springer-Verlag, 1991 (izbrana poglavja) Dostopno na spletu na DiKUL.

### Cilji in kompetence:

#### Cilji:

Študentu prikazati princip delovanja računalniških programov za simulacijo toka tekočine (kapljev in plinov) in spremljajočih transportnih pojavov, opisanih s parcialnimi diferencialnimi enačbami (PDE). Študent naj pozna različne načine diskretizacije PDE s poudarkom na metodi končnih volumnov, ki prevladuje v trenutno razširjenih (komercialnih) programih. Razumeti mora probleme diskretizacije: konsistentnost, stabilnost, konvergenca, red natančnosti, numerično difuzijo in disperzijo. Spozna specifično reševanje Navier-Stoksove enačbe in probleme

### Objectives and competences:

#### Goals:

The course should show the basic principles of the computer codes for the simulation of fluid flow (liquids, and gases) accompanied by different transport phenomena, described with the corresponding partial differential equations (PDE). Students should be familiar with different methods of PDE discretization; the emphasis is on the finite volume method which prevails in popular (commercial) CFD codes. An aim is the understanding of the problems of discretization: consistency, stability, convergence, order of discretization, numerical diffusion and

<p>povezane z modeliranjem turbulentnega toka. Sposoben naj bo izbrati obravnavanemu fizikalnemu problemu ustrezen model in verificirati izračunane rezultate.</p> <p><b>Kompetence:</b></p> <p>Pridobljeno razumevanje delovanja računalniških programov za simulacijo toka tekočine omogoča smiselno uporabo le-teh in kritično ovrednotenje izračunanih rezultatov.</p>	<p>dispersion. Students should be aware of the particularities when solving the Navier-Stokes equation and the problems of modelling turbulent flow. They should be capable to select the relevant model for the considered physical problem and also to verify the obtained results.</p> <p><b>Competences:</b></p> <p>A participant acquires understanding of the basic principles of CFD codes. Therefore she/he should be capable to efficiently use such codes as well as critical assessment of the calculated results.</p>
--	---

<b>Predvideni študijski rezultati:</b>	<b>Intended learning outcomes:</b>
<p>Pridobljeno razumevanje delovanja računalniških programov za simulacijo toka tekočine omogoča smiselno uporabo le-teh in kritično ovrednotenje izračunanih rezultatov.</p>	<p>A participant acquires understanding of the basic principles of CFD codes. Therefore she/he should be capable to efficiently use such codes as well as critical assessment of the calculated results.</p>

<b>Metode poučevanja in učenja:</b>	<b>Learning and teaching methods:</b>
<p>Predavanja, laboratorijske vaje, seminarsko delo, e-izobraževanje, konzultacije. Seminarsko delo v čim večji meri navezuje se na področje doktorskega raziskovanja. Študij z uporabo priporočene literature.</p>	<p>Lectures, laboratory practice &amp; seminar work, e-education, consulting. The seminar work is related, as much as possible, to the student's doctoral research field. Study on a recommended literature basis.</p>

<b>Načini ocenjevanja:</b>	<b>Delež/Weight</b>	<b>Assessment:</b>
<p>Ustni izpit, poročilo o seminarskem delu. Pogoji za opravljanje ustnega izpita je uspešno izdelano in pozitivno ocenjeno seminarsko delo. Način (ustno izpraševanje, projekt): • projekt (seminarska naloga) (70%) • ustno izpraševanje (30%)</p>		<p>Oral exam, report on seminar work. The condition for admission to oral exam is successful completion of seminar work, rewarded with a passing grade. Method (oral examination, project): • project (seminar assignment) (70%) • oral</p>

		examination (30%)
--	--	-------------------

### Ocenjevalna lestvica:

### Grading system:

5 - 10, pri čemer velja, da je pozitivna ocena od 6 - 10	5 - 10, a student passes the exam if he is graded from 6 to 10
--	--

### Reference nosilca/Lecturer's references:

#### prof. dr. Božidar ŠARLER

NAJAFI, Mahboubbeh, DEHGHAN, Mehdi, ŠARLER, Božidar, KOSEC, Gregor, MAVRIČ, Boštjan. Divergence-free meshless local Petrov-Galerkin method for Stokes flow. Engineering with computers. [Online ed.]. [in press] 2022, 19 str. ISSN 1435-5663. DOI: 10.1007/s00366-022-01621-w. [COBISS.SI-ID 99503875], [JCR, SNIP, WoS do 26. 9. 2022: št. citatov (TC): 1, čistih citatov (CI): 1, čistih citatov na avtorja (CIAu): 0,20, Scopus do 23. 9. 2022: št. citatov (TC): 3, čistih citatov (CI): 3, čistih citatov na avtorja (CIAu): 0,60]

RANA, Khush Bakhat, MAVRIČ, Boštjan, ZAHOOOR, Rizwan, ŠARLER, Božidar. A meshless solution of the compressible viscous flow in axisymmetric tubes with varying cross-sections. Engineering analysis with boundary elements. Oct. 2022, vol. 143, str. 340-352, ilustr. ISSN 0955-7997.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955799722002260>,  
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=138374>, DOI: 10.1016/j.enganabound.2022.06.029. [COBISS.SI-ID 114950915], [JCR, SNIP, WoS, Scopus]

ZAMOLO, Riccardo, NOBILE, Enrico, ŠARLER, Božidar. Novel multilevel techniques for convergence acceleration in the solution of systems of equations arising from RBF-FD meshless discretizations. Journal of computational physics. [Print ed.]. 2019, vol. 392, str. 311-334, ilustr. ISSN 0021-9991.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021999119303171>.  
[COBISS.SI-ID 16607003], [JCR, SNIP, WoS do 12. 5. 2023: št. citatov (TC): 9, čistih citatov (CI): 8, čistih citatov na avtorja (CIAu): 2,67, Scopus do 25. 4. 2023: št. citatov (TC): 9, čistih citatov (CI): 8, čistih citatov na avtorja (CIAu): 2,67]

FAN, Chia-Ming, CHU, Chi-Nan, ŠARLER, Božidar, LI, Tsung-Han. Numerical solutions of waves-current interactions by generalized finite difference method. Engineering analysis with boundary elements. 2019, vol. 100, str. 150-163, ilustr. ISSN 0955-7997.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955799717302849?via%3Dihub>, DOI: 10.1016/j.enganabound.2018.01.010. [COBISS.SI-ID 15978779], [JCR, SNIP, WoS do 14. 4. 2023: št. citatov (TC): 31, čistih citatov (CI): 31, čistih citatov na avtorja (CIAu): 7,75, Scopus do 29. 3. 2023: št. citatov (TC): 32, čistih citatov (CI): 32, čistih citatov na avtorja (CIAu): 8,00]