

METODE NUMERIČNEGA MODELIRANJA

UČNI NAČRT PREDMETA/COURSE SYLLABUS

Predmet:	Metode numeričnega modeliranja
Course title:	Numerical modelling methods
Članica nosilka/UL Member:	UL FS

Študijski programi in stopnja	Študijska smer	Letnik	Semestri	Izbirnost
Strojništvo - razvojno raziskovalni program, prva stopnja, univerzitetni (od študijskega leta 2024/2025 dalje)	Ni členitve (študijski program)	3. letnik	1. semester	obvezni

Univerzitetna koda predmeta/University course code:	0562764
Koda učne enote na članici/UL Member course code:	2027-U

Predavanja /Lectures	Seminar /Seminar	Vaje /Tutorials	Klinične vaje /Clinical tutorials	Druge oblike študija /Other forms of study	Samostojno delo /Individual student work	ECTS
30		30			65	5

Nosilec predmeta/Lecturer:	Bojan Starman, Miroslav Halilović, Nikolaj Mole
-----------------------------------	---

Izvajalci predavanj:	
Izvajalci seminarjev:	
Izvajalci vaj:	
Izvajalci kliničnih vaj:	
Izvajalci drugih oblik:	
Izvajalci praktičnega usposabljanja:	

Vrsta predmeta/Course type: Obvezni splošni predmet /Compulsory general course

Jeziki/Languages:

Predavanja/Lectures:	Slovenščina
Vaje/Tutorial:	Slovenščina

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

Prerequisites:

Izpolnjevanje pogojev za vpis v Univerzitetni študijski program I. stopnje Strojništvo - Razvojno raziskovalni program.

Meeting the enrollment conditions for the Academic study programme of Mechanical Engineering - Research and Development program.

Vsebina:

Content (Syllabus outline):

. Uvod v numerično modeliranje

- Opredelitev fizikalnega, matematičnega in numeričnega modela, značilnosti modelov, prostostne stopnje

2. Eksaktno reševanje robnega problema

- Robni pogoji in pogoji konsistentnega prehoda
- Reševanje kontinualnih sistemov, primer osno obremenjenega konstrukcijskega elementa

3. Aproksimativno reševanje

- Funkcijski in interpolacijski pristop
- Transformacija diferencialnih zvez v diferenčne

4. Metoda končnih razlik

- Izpolnjevanje diferencialne enačbe
- Izpolnjevanje robnih pogojev
- Izpolnjevanje pogojev konsistentnega prehoda na meji med podobmočji
- Reševanje primerov in analiza rezultatov

5. Integralska variacijska formulacija

- Osnovna oblika integralske formulacije
- Šibka oblika integralske formulacije
- Inverzna oblika integralske formulacije

6. Metoda končnih elementov - 1.del

- Aproksimacija primarne spremenljivke
- Izpeljava enačbe končnega elementa

Introduction to numerical modelling

- Definition of physical, mathematical and numerical model, characteristics, DOF

2. Exact solving the boundary problem

- Boundary and internal domain conditions
- Solution of continuous systems – case of axially loaded structural element

3. Approximate solving

- Functional and interpolation approach
- Transformation of differential equations into difference ones

4. Finite difference method

- Fulfillment of differential equation
- Fulfillment of boundary conditions
- Fulfillment of conditions on the boundary between subdomains
- Case studies and analyzing the results

5. Variational formulation by integral equation

- Basic integral formulation
- Weak integral formulation
- Inverse integral formulation

6. Finite element method – 1st part

- Approximation of the primary variable
- Derivation of the finite element equation

7. Finite element method – 2nd part

<p>7. Metoda končnih elementov – 2.del</p> <ul style="list-style-type: none"> - Izpolnjevanje robnih pogojev - Izpolnjevanje pogojev konsistentnega prehoda - Reševanje primerov in analiza rezultatov <p>8. Metoda robnih elementov</p> <ul style="list-style-type: none"> - Aproksimacija primarne spremenljivke - Izpeljava enačbe robnega elementa - Izpolnjevanje robnih pogojev - Izpolnjevanje pogojev konsistentnega prehoda - Reševanje primerov in analiza rezultatov <p>9. Metoda končnih volumnov</p> <ul style="list-style-type: none"> - Matematični model 1D toka tekočine - Integralska formulacija - Izplejava enačbe za končni volumen - Izpolnjevanje robnih pogojev - Izpolnjevanje pogojev konsistentnega prehoda - Reševanje primerov in analiza rezultatov <p>10. Vplivi na natančnost numerične rešitve</p> <ul style="list-style-type: none"> - Metoda končnih razlik - Metoda končnih elementov - Metoda končnih volumnov - Reševanje primerov in analiza rezultatov <p>11. Reševanje časovno odvisnih problemov</p> <ul style="list-style-type: none"> - Matematični model 1D prevoda toplote - Implicitna časovna shema - Eksplicitna časovna shema - Stabilnost numeričnega izračuna <p>12. Reševanje problemov z več primarnimi spremenljivkami – 1.del</p> <ul style="list-style-type: none"> - Izpeljava vodilne enačbe - Izpolnjevanje robnih pogojev - Izpolnjevanje pogojev konsistentnega prehoda - Uporaba metode končnih razlik - Reševanje primerov in analiza rezultatov <p>13. Reševanje problemov z več primarnimi spremenljivkami – 2.del</p> <ul style="list-style-type: none"> - Uporaba metode končnih elementov - Primerjava različnih tipov končnih 	<ul style="list-style-type: none"> - Fulfillment of boundary conditions - Fulfillment of conditions on the boundary between subdomains - Case studies and analyzing the results <p>8. Boundary element method</p> <ul style="list-style-type: none"> - Approximation of the primary variable - Derivation of the boundary element equation - Fulfillment of boundary conditions - Fulfillment of conditions on the boundary between subdomains - Case studies and analyzing the results <p>9. Finite volume method</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mathematical model of 1D fluid flow - Integral formulation - Derivation of the finite volume element equation - Fulfillment of boundary conditions - Fulfillment of conditions on the boundary between subdomains - Case studies and analyzing the results <p>10. Influence on accuracy of the numerical solution</p> <ul style="list-style-type: none"> - Finite difference method - Finite element method - Finite volume method - Case studies and analyzing the results <p>11. Time-dependent problems</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mathematical model of 1D heat transfer - Implicit time integration scheme - Explicit time integration scheme - Stability in the numerical computation <p>12. Problems with multiple primary variables – 1st part</p> <ul style="list-style-type: none"> - Derivation of the main equation - Fulfillment of boundary conditions - Fulfillment of conditions on the boundary between subdomains - Use of finite difference method - Case studies and analyzing the results <p>13. Problems with multiple primary variables – 2nd part</p> <ul style="list-style-type: none"> - Use of the finite element method
--	---

<p>elementov</p> <ul style="list-style-type: none"> - Uporaba metode končnih volumnov - Reševanje primerov in analiza rezultatov <p>14. Reševanje 2D problemov - 1.del</p> <ul style="list-style-type: none"> - Uporaba metode končnih razlik - Izpeljava shem za aproksimacijo odvodov - Izboljšava rešitve ob robovih območja <p>15. Reševanje 2D problemov - 2.del</p> <ul style="list-style-type: none"> - Uporaba metode končnih elementov - Uporaba metode končnih volumnov - Reševanje primerov in analiza rezultatov 	<ul style="list-style-type: none"> - Comparison between different finite elements - Use of finite volume method - Case studies and analyzing the results <p>14. Solving 2D problems - 1st part</p> <ul style="list-style-type: none"> - Use of the finite difference method - Derivation of different approximation scheme for derivatives - Improvement the solution along the edges of the domain <p>15. Solving 2D problems - 2nd part</p> <ul style="list-style-type: none"> - Use of the finite element method - Use of the finite volume method - Case studies and analyzing the results
--	---

Temeljna literatura in viri/Readings:

1. S.S.Rao: The Finite Element Method in Engineering, Elsevier, 201 [COBISS.SI-ID [11983387](#)]
2. F.W. Ames: Numerical Methods for Partial Differential Equations, Academic Press, 199 [COBISS.SI-ID [2455830](#)]
3. H.K. Versteeg: An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method, Pearson Education, 2007. [COBISS.SI-ID [28914181](#)]
4. N. Mole: *Metode numeričnega modeliranja : dodatno študijsko gradivo za predavanja pri predmetu : Univerzitetni študijski program 1. stopnje Strojništvo - RRP 3. letnik*. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, 2018. 720 str. [COBISS.SI-ID [15883803](#)]

Cilji in kompetence:

Cilji:

1. Spoznati teoretično ozadje numeričnih metod, ki se uporabljajo pri numeričnem modeliranju fizikalnih problemov
2. Pridobiti znanje o prednostih in slabostih metod numeričnega modeliranja posameznih problemov
3. Spoznati vplive na natančnost numerične rešitve

Kompetence:

1. Izbira ustrezne numerične metode pri numeričnem modeliranju inženirskih problemov (S6-RRP + P3-RRP + P4-RRP)
2. Sposobnost priprave numeričnega modela (S1-RRP + P3-RRP + P4-RRP)

Objectives and competences:

Goals:

1. Understand the theoretical background of numerical methods used in numerical modeling of physical problems
2. To acquire knowledge about the advantages and disadvantages of numerical modeling methods for individual problems
3. To know the influence on the accuracy of the numerical solution

Competences:

1. Selection of appropriate numerical method for numerical modeling of engineering problems (S6-RRP + P3-RRP + P4-RRP)
2. The ability to prepare a numerical

3. Analiza rezultatov upoštevajoč specifiko uporabljene numerične metode (S6-RRP + P4-RRP)	model (S1-RRP + P3-RRP + P4-RRP) 3. Analysis of results taking into account the specifics of the used numerical method (S6-RRP + P4-RRP)
--	---

Predvideni študijski rezultati:

Intended learning outcomes:

<p>Znanja:</p> <p>Poglobljeno teoretično in praktično znanje o numeričnih metodah in njihovi uporabi pri numeričnem modeliranju inženirskih problemov.</p> <p>Spretnosti:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. S2: Učinkovito numerično modeliranje inženirskih problemov s pravo izbiro numerične metode 2. S1.4: Analiza rezultatov numeričnega reševanja upoštevajoč specifiko posamezne numerične metode 	<p>Knowledge:</p> <p>In-depth theoretical and practical knowledge of numerical methods and their application in numerical modeling of engineering problems.</p> <p>Skills:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. S2: Effective numerical modeling of engineering problems with the optimal choice of numerical method 2. S1.4: Analysis of the results of numerical solving taking into account the specifics of each numerical method
---	--

Metode poučevanja in učenja:

Learning and teaching methods:

<p>P1 Avditorna predavanja z reševanjem izbranih - za področje značilnih - teoretičnih in praktično uporabnih primerov</p> <p>P2 Obravnava snovi po urejeni in vnaprej razloženi sistematiki</p> <p>P5 Uporaba študijskega gradiva v obliki PPT prosojnic, ki jih študent za posamezno predavanje dobi pred predavanjem</p> <p>P7 Študij literature in razprava</p> <p>P10 Uporaba anket v realnem času</p> <p>P15 Uporaba video vsebin kot priprava na predavanja in vaje</p>	<p>P1 Lectures with solving selected typical and theoretical examples</p> <p>P2 Study content is discussed according to an orderly and pre-explained systematics</p> <p>P5 Use of study material in the form of PPT slides, which the student receives for each lecture before the lecture</p> <p>P7 Literature studies and discussion</p> <p>P10 Use real-time surveys</p> <p>P15 Using video content as a preparation for lectures and tutorials</p>
--	--

Načini ocenjevanja:

**Delež/
Weight**

Assessment:

Teoretične vsebine	50,00 %	Theory
Praktične vsebine	30,00 %	Practical work
Samostojno delo	20,00 %	Coursework

Ocenjevalna lestvica:

5 - 10, pri čemer velja, da je pozitivna ocena od 6 - 10

Grading system:

5 - 10, a student passes the exam if he is graded from 6 to 10

Reference nosilca/Lecturer's references:**Miroslav Halilovič:**

1. **HALILOVIČ, Miroslav**, UREVC, Janez, KOC, Pino. Prediction of recirculation flow rate for icing prevention in water intake supply systems of nuclear power plants. *Cold regions science and technology*, ISSN 0165-232X, May 2019, vol. 161, str. 63-70. [COBISS.SI-ID [16512283](#)] (tip. 01)
2. POŽAR, Tomaž, HORVAT, Darja, STARMAN, Bojan, **HALILOVIČ, Miroslav**, PETKOVŠEK, Rok. Pressure wave propagation effects in the eye after photoablation. *Journal of applied physics*, ISSN 0021-8979, May 2019, vol. 125, iss. 20, str. 1-9. [COBISS.SI-ID [16628763](#)] (tip. 1.01)
3. **HALILOVIČ, Miroslav**, STARMAN, Bojan, VRH, Marko, ŠTOK, Boris. A robust explicit integration of elasto-plastic constitutive models, based on simple subincrement size estimation. *Engineering computations*, ISSN 0264-4401, 2017, vol. 34, iss. 6, str. 1774-1806. [COBISS.SI-ID [15583259](#)] (tip. 1.01)
4. UREVC, Janez, **HALILOVIČ, Miroslav**, BRUMEN, Milan, ŠTOK, Boris. An approach to consider the arterial residual stresses in modelling of a patient-specific artery. *Advances in mechanical engineering*, ISSN 1687-8140, Nov. 2016, vol. 8, [nr.] 11, f. 1-19. [COBISS.SI-ID [15115035](#)] (tip. 1.01)
5. HRANJEC, Dalibor, **HALILOVIČ, Miroslav**, MOLE, Nikolaj, STARMAN, Bojan. Izračun napetostnega stanja iz izmerjenega polja deformacij z uporabo metode končnih elementov = Stress reconstruction from strain fields under alignment assumption using finite element method. V: SLAVIČ, Janko (ur.), ČESNIK, Martin (ur.). *Kuhljevi dnevi 2023 : zbornik del : Bled, 21.-22. september 2023*. Ljubljana: Slovensko društvo za mehaniko, 2023. Str. 83-90, ilustr. ISBN 978-961-93859-8-2. [COBISS.SI-ID [165929475](#)] (tip. 1.08)

Nikolaj Mole:

1. MARKEŽIČ, Rok, NAGLIČ, Iztok, **MOLE, Nikolaj**, ŠTURM, Roman. Experimental and numerical analysis of failures on a die insert for high pressure die casting. *Engineering failure analysis*, ISSN 1350-6307. [Print ed.], Jan. 2019, vol. 95, str. 171-180. [COBISS.SI-ID [16374299](#)] (tip. 01)
2. KOVŠCA, Dejan, STARMAN, Bojan, KLOBČAR, Damjan, HALILOVIČ, Miroslav, **MOLE, Nikolaj**. Towards an automated framework for the finite element computational modelling of directed energy deposition. *Finite elements in analysis and design*. [Print ed.]. Sept. 2023, vol. 221, str. 1-12, ilustr. ISSN 0168-874X. [COBISS.SI-ID [150969347](#)] (tip. 1.01)
3. KASTELIC, Tomaž, STARMAN, Bojan, CAFUTA, Gašper, HALILOVIČ, Miroslav, **MOLE, Nikolaj**. Correction of mould cavity geometry for warpage compensation. *International journal of advanced manufacturing technology*. Nov. 2022, vol. 123, str. 1957-1971, ilustr. ISSN 0268-3768. [COBISS.SI-ID [127300355](#)] (tip. 1.01)
4. KOVŠCA, Dejan, STARMAN, Bojan, ŠČETINEC, Aljaž, KLOBČAR, Damjan, **MOLE, Nikolaj**. Advanced computational modelling of metallic wire-arc additive manufacturing. V: HABRAKEN, Anne Marie (ur.). *24th International*

Conference on Material Forming, Liège, Belgium, 14 - 16 April, 2021 : ESAFORM 2021. 24th International Conference on Material Forming, Liège, Belgium, 14 - 16 April, 2021. Liège: AIM. 2021, str. 1-11, ilustr. [COBISS.SI-ID [63316227](#)] (tip. 08)

5. **MOLE, Nikolaj**, STARMAN, Bojan, KOC, Pino, HALILOVIČ, Miroslav, KOTAR, Andrej. *Fem simulation of progressive stamping process : project phase 4 : zaključno poročilo*. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, 2017. II, 41str. [COBISS.SI-ID [15529243](#)] (tip. 2.12)

Bojan Starman:

1. HALILOVIČ, Miroslav, **STARMAN, Bojan**, COPPIETERS, Sam. Computationally efficient stress reconstruction from full-field strain measurements. *Computational mechanics*. Mar. 2024, str. 1-24, ilustr. ISSN 1432-0924. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00466-024-02458-4>, DOI: 10.1007/s00466-024-02458-4. [COBISS.SI-ID [190346755](#)]
2. KOVŠCA, Dejan, **STARMAN, Bojan**, KLOBČAR, Damjan, HALILOVIČ, Miroslav, MOLE, Nikolaj. Towards an automated framework for the finite element computational modelling of directed energy deposition. *Finite elements in analysis and design*. [Print ed.]. Sept. 2023, vol. 221, str. 1-12, ilustr. ISSN 0168-874X. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168874X23000422>, Repozitorij Univerze v Ljubljani - RUL, DOI: 10.1016/j.finel.2023.103949. [COBISS.SI-ID [150969347](#)]
3. UREVC, Janez, **STARMAN, Bojan**, MAČEK, Andraž, HALILOVIČ, Miroslav. A novel class of collocation methods based on the weighted integral form of ODEs. *Computational & Applied Mathematics*. Jun. 2021, vol. 40, iss. 4, str. 1-28, ilustr. ISSN 1807-0302. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40314-021-01506-6>, DOI: 10.1007/s40314-021-01506-6. [COBISS.SI-ID [62500867](#)]
4. HALILOVIČ, Miroslav, **STARMAN, Bojan**, VRH, Marko, ŠTOK, Boris. A robust explicit integration of elasto-plastic constitutive models, based on simple subincrement size estimation. *Engineering computations*. 2017, vol. 34, iss. 6, str. 1774-1806, ilustr. ISSN 0264-4401. <http://www.emeraldinsight.com/doi/pdfplus/10.1108/EC-03-2016-0103>, DOI: 10.1108/EC-03-2016-0103. [COBISS.SI-ID [15583259](#)]
5. KOVŠCA, Dejan, **STARMAN, Bojan**, ŠČETINEC, Aljaž, KLOBČAR, Damjan, MOLE, Nikolaj. Advanced computational modelling of metallic wire-arc additive manufacturing. V: HABRAKEN, Anne Marie (ur.). *24th International Conference on Material Forming, Liège, Belgium, 14 - 16 April, 2021 : ESAFORM 2021*. 24th International Conference on Material Forming, Liège, Belgium, 14 - 16 April, 2021. Liège: AIM. 2021, str. 1-11, ilustr. <https://popups.uliege.be/esaform21/index.php?id=2340>, Repozitorij Univerze v Ljubljani - RUL, DOI: 10.25518/esaform21.2340. [COBISS.SI-ID [63316227](#)]