

ANALIZA KONSTRUKCIJ Z MKE

UČNI NAČRT PREDMETA/COURSE SYLLABUS

Predmet:	Analiza konstrukcij z MKE
Course title:	FEM Structural Analysis
Članica nosilka/UL Member:	UL FS

Študijski programi in stopnja	Študijska smer	Letnik	Semestri	Izbirnost
Strojništvo - Razvojno raziskovalni program, druga stopnja, magistrski	Mehanika (smer)	1. letnik	2. semester	obvezni

Univerzitetna koda predmeta/University course code:	0566898
Koda učne enote na članici/UL Member course code:	6037-M

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:	izr. prof. dr. Miroslav Halilović, izr. prof. dr. Nikolaj Mole
-----------------------------------	--

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

Vrsta predmeta/Course type:	Obvezni strokovni predmet na smeri Mehanika, ki je izbirni strokovni predmet na ostalih smereh./Compulsory specialised course in the study of Mechanics, which is an elective specialised course in other fields of study.
------------------------------------	--

Jeziki/Languages:	Predavanja/Lectures:	Slovenščina
	Vaje/Tutorial:	Slovenščina

Pogoji za vključitev v delo oz. za opravljanje študijskih obveznosti:	Prerequisites:
Ni pogojev.	No conditions.

Vsebina:	Content (Syllabus outline):
1. Osnove modeliranja konstrukcij - Geometrijski model - Fizikalni model - Matematični model	1. Fundamentals of modeling of structures - Geometric model - Physical model - Mathematical model

2. Geometrijsko modeliranje - Volumski model - Ploskovni model - Linijski model 3. Numerično modeliranje - Primerjava numeričnih metod iz vidika primernosti za analizo konstrukcij - Izpolnjevanje robnih pogojev - Koraki pri analizi z MKE - Poenostavitev geometrijskega modela 4. Koraki pri analizi z MKE – 1.del - Izbira geometrijske oblike KE - Priprava mreže z 1D KE - Priprava mreže z 2D KE - Kontrola kvalitete mreže z 2D KE 5. Koraki pri analizi z MKE – 2. del - Priprava mreže s 3D KE - Kontrola kvalitete mreže s 3D KE - Določitev fizikalnih lastnosti materiala - Določitev geometrijskih lastnosti KE - Določitev začetnih, robnih in obremenitvenih pogojev 6. Izoparametrični KE - Interpolacijske funkcije - Preslikava v naravni koordinatni sistem - Preslikava v volumnske koordinate 7. Heksaedrični KE - Integracija upoštevajoč naravni koordinatni sistem - Integracijske točke - Gaussove integracijska formula - Matrični zapis sistema linearnih enačb 8. Tetraedrični KE - Integracija upoštevajoč volumnske koordinate - Integracija upoštevajoč Gaussovo integracijsko formulo - Primer reševanja volumnskega problema – prevod toplote - Reševanje sistema linearnih enačb - Prikaz rezultatov - Analiza rezultatov 9. 3D KE za reševanje toplotnih ali mehanskih problemov - Matrični zapis sistema enačb - Določitev števila prostostnih stopenj KE - Točkovna obremenitev - Ploskovna porazdeljena obremenitev - Volumsko porazdeljena obremenitev - Prikaz in analiza rezultatov 10. Osnosimetrični KE za reševanje toplotnih ali mehanskih problemov - Preslikava iz Kartezijevega v cilindrični koordinatni sistem	2. Geometric modeling - Volume model - Surface model - Line model 3. Numerical modeling - Comparison of numerical methods in terms of suitability for structural analysis - Fulfilment of boundary conditions - Basic steps in FE analysis - Simplification of the geometric model 4. Steps in FE analysis – 1st part - Choice of FE geometries - 1D FE mesh generation - 2D FE mesh generation - Quality control of 2D FE mesh 5. Steps in FE analysis – 2nd part - 3D FE mesh generation - Quality control of 3D FE mesh - Determination of the physical properties of materials - Determination of the geometrical properties of FEs - Determination of initial, boundary and loading conditions 6. Isoparametric FE - Interpolation functions - Mapping to a natural coordinate system - Mapping to a volume coordinate system 7. Hexahedral FE - Integration considering the natural coordinate system - Integration points – Gaussian quadrature rule - Matrix form of the system of linear equations 8. Tetrahedral FE - Integration considering volume coordinate system - Integration considering Gaussian quadrature rule - Example of solving a volume problem - heat transfer - Solving a system of linear equations - Visualization of the results - Analysis of the results 9. 3D FE to solve thermal or mechanical problems - Matrix form of the system of linear equations - Determination of the number of FE DOF - Point load - Area distributed load - Volume distributed load - Visualization and analysis of the results 10. Axisymmetric FE to solve thermal or mechanical problems
--	--

- Pogoji za uporabo osnosimetričnih KE - Matrični zapis sistema linearnih enačb - Vrste obremenitev - Prikaz in analiza rezultatov 11. 2D KE za reševanje toplotnih ali mehanskih problemov - Pogoji za uporabo 2D KE - Obravnava 2D toplotnega problema - Obravnava ravninsko napetostnega stanja - Obravnava ravninsko deformacijskega stanja - Obravnava generaliziranega ravninsko deformacijskega stanja 12. Ploskovni KE za reševanje upogiba plošč - Matrični zapis sistema enačb za primer upoštevanja Reissner-Mindlinove teorije plošč - Numerično integriranje - Vrste obremenitev - Prikaz in analiza rezultatov 13. Lupinski KE za reševanje mehanskih problemov - Vpeljava lokalnega koordinatnega sistema - Matrični zapis sistema linearnih enačb - Prikaz in analiza rezultatov 14. Linijski KE - Matrični zapis sistema enačb za primer osno obremenjenih konstrukcijskih elementov - Matrični zapis sistema enačb za primer upoštevanja Euler-Bernoullijeve teorije upogibno obremenjenih nosilcev - Matrični zapis sistema enačb za primer upoštevanja Timoshenkove teorije upogibno obremenjenih nosilcev - Vrste obremenitev - Prikaz in analiza rezultatov 15. Napredno reševanje z MKE - Zrcalna simetrija - Antisimetričnost - Ciklična simetričnost - Periodični robni pogoji - Povezava različnih tipov KE	- Mapping from Cartesian to cylindrical coordinate system - Conditions for use of axisymmetric FEs - Matrix form of the system of linear equations - Types of loads - Visualization and analysis of the results 11. 2D FE to solve thermal or mechanical problems - Conditions for the use of 2D FEs - Analysis of 2D heat transfer - Analysis of plane stress state - Analysis of plane strain state - Analysis of generalized plane strain state 12. 2D FE to solve plate bending problems - Matrix form of the system of linear equations in case of Reissner-Mindlin's theory of plates - Numerical integration - Types of loads - Visualization and analysis of the results 13. Shell FE to solve shell structure problems - Implementation of the local coordinate system - The matrix form of a system of linear equations - Visualization and analysis of the results 14. 1D FE - Matrix form of the system of linear equations in case of axial loaded construction elements - Matrix form of the system of linear equations in case of Euler-Bernoulli theory of bending beams - Matrix form of the system of linear equations in case of Timoshenko beam theory of bending - Types of loads - Visualization and analysis of the results 15. Advanced use of FEM - Mirror symmetry - Antisymmetry - Cyclic symmetry - Periodic boundary conditions - Connection of different types of FEs
--	---

Temeljna literatura in viri/Readings:

1. O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, D.D. Fox: The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics, Elsevier, 2006. [COBISS.SI-ID [10942486](#)]
2. S.S. Rao: The Finite Element Method in Engineering, Elsevier, 2011. [COBISS.SI-ID [11983387](#)]
3. J.N. Reddy: An Introduction to the Finite Element Method, McGraw-Hill, third ed., 199 [COBISS.SI-ID [758299](#)]
4. N. Mole: Računalniška analiza konstrukcij : dodatno študijsko gradivo za predavanja, FS-ULJ, 2018. [COBISS.SI-ID [15884059](#)]

5. B. Starman, J. Urevc: Računalniška analiza konstrukcij – dodatno študijsko gradivo za vaje, FS, 2019. [COBISS.SI-ID [16998427](#)]
6. M. A. Crisfield: Non-linear finite element analysis of solids and structures, John Wiley & Sons, 1991. [COBISS.SI-ID [204315](#)]

Cilji in kompetence:

Cilji: 1. Spoznati teoretično ozadje posameznih tipov končnih elementov, ki se uporabljajo pri računalniški analizi konstrukcij 2. Pridobiti znanje za pripravo numeričnega modela konstrukcije 3. Obvladovanje definiranja obremenitvenih pogojev 4. Pridobiti kompetence za prikaz in vrednotenje rezultatov numerične analize Kompetence: 1. Obvladovanje teoretičnega ozadja metode končnih elementov s ciljem razvoja lastne programske kode (S10-MAG + P3-MAG + P4-MAG) 2. Sposobnost priprave optimalnega numeričnega modela konstrukcije (S10-MAG + P4-MAG) 3. Prikaz in analiza rezultatov upoštevajoč specifiko uporabljenih tipov končnih elementov in fizikalnega problema (S7-MAG + P7-MAG)

Objectives and competences:

Goals: 1. To acquire knowledge about the theoretical background of the individual types of finite elements used in the computer analysis of structures 2. To acquire knowledge to prepare a numerical model of structure 3. Mastering the determination of loading conditions 4. Acquire competencies to display and evaluate the results of numerical analysis Competences: 1. Mastering the theoretical background of the finite element method with the aim of developing your own program code (S10-MAG + P3-MAG + P4-MAG) 2. The ability for preparing the optimal numerical model of the structures (S10-MAG + P4-MAG) 3. Presentation and analysis of results taking into account the specifics of the used finite elements and the physical problem (S7-MAG + P7-MAG)
--

Predvideni študijski rezultati:

Znanja: Poglobljeno teoretično in metodološko znanje o uporabi metode končnih elementov ter njeni implementaciji v lastne računalniške programe za modeliranje zahtevnih fizikalnih problemov. Spretnosti: 1. S2.1: Obvladovanje učinkovite računalniško podprte analize konstrukcij na osnovi metode končnih elementov, ter kritična analiza in interpretacija rezultatov. 2. S2.3: Sposobnost razvoja specifičnega programskega orodja za analizo konstrukcij.
--

Intended learning outcomes:

Knowledge: In-depth theoretical and methodological knowledge of the application of finite element method and its implementation into own computer codes for modeling complex physical problems. Skills: 1. S2.1: Mastering efficient computer-aided finite element analysis of structures, and critical analysis and interpretation of results. 2. S2.3: Ability to develop a specific software tool for structural analysis.

Metode poučevanja in učenja:

--

Learning and teaching methods:

--

P1 Avditorna predavanja z reševanjem izbranih - za področje značilnih - teoretičnih in praktično uporabnih primerov P2 Obravnava snovi po urejeni in vnaprej razloženi sistematiki P5 Uporaba študijskega gradiva v obliki PPT prosojnic, ki jih študent za posamezno predavanje dobi pred predavanjem P7 Študij literature in razprava P8 Izdelava in predstavitev aplikativnih seminarskih nalog P10 Uporaba anket v realnem času P15 Uporaba video vsebin kot priprava na predavanja in vaje	P1 Lectures with solving selected typical and theoretical examples P2 Study content is discussed according to an orderly and pre-explained systematics P5 Use of study material in the form of PPT slides, which the student receives for each lecture before the lecture P7 Literature studies and discussion P8 Preparation and presentation of applied seminar work P10 Use real-time surveys P15 Using video content as a preparation for lectures and tutorials
--	---

Načini ocenjevanja:	Delež/Weight	Assessment:
Del A: Teoretične vsebine	50,00 %	Part A: Theory
Del B: Praktične vsebine in samostojno delo	50,00 %	Part B: Practical work and coursework
Skupna ocena predmeta je povprečje Dela A in Dela B, pri čemer je ocena pozitivna samo, če sta oba dela pozitivna na istem izpitnem roku.		The overall course grade is the average of Part A and Part B, but the grade is positive only if both parts are positive on the same exam.

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:

Miroslav Halilović:

- POŽAR, Tomaž, **HALILOVIČ, Miroslav**, HORVAT, Darja, PETKOVŠEK, Rok. Simulation of wave propagation inside a human eye : acoustic eye model (AEM). Applied physics. A, Materials science & processing, ISSN 0947-8396, Feb. **2018**, vol. 124, iss. 2, str. 1-9. [COBISS.SI-ID [15835931](#)]
- 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](#)]
- MAČEK, Andraž, UREVC, Janez, ŽAGAR, Tomaž, **HALILOVIČ, Miroslav**. Crimp joint with low sensitivity to process parameters: numerical and experimental study. *International journal of material forming*. July **2021**, vol. 14, str. 1233-1241, ilustr. ISSN 1960-6206. [COBISS.SI-ID [72089859](#)]
- KRALJ, Aleš, ŽNIDARŠIČ, Matjaž, **HALILOVIČ, Miroslav**, VRH, Marko, ŠTOK, Boris. *Building panel as structure of external and inner plate with intermediate insulation space : EP2464799 (B1)*, 2020-05-06. Munich: European Patent Office, **2020**. 10 f., 2 f. pril., ilustr. [COBISS.SI-ID [12108571](#)]
- RUS, Primož, **HALILOVIČ, Miroslav**, KOTAR, Andrej, MOLE, Nikolaj, UREVC, Janez, STARMAN, Bojan, MAČEK, Andraž, NABERGOJ, Matija. *SPL Cycle : basic design of pilot unit*. Ljubljana: Faculty of Mechanical Engineering, Laboratory for Numerical Modelling and Simulation, **2018**. 15 f., graf. prikazi. [COBISS.SI-ID [16475163](#)]

Nikolaj Mole:

1. KARIMI, Ako, **MOLE, Nikolaj**, PEPELNJAK, Tomaž. Numerical investigation of the cycling loading behavior of 3D-Printed poly-lactic acid (PLA) cylindrical lightweight samples during compression testing. *Applied sciences*. Aug. **2022**, vol. 12, iss. 16, str. 1-18, ilustr. ISSN 2076-3417. [COBISS.SI-ID [118174211](#)]
2. KUTIN, Jože, BOBOVNIK, Gregor, **MOLE, Nikolaj**, SCHAKEL, Menne D., BÜKER, Oliver. Measurement corrections for temperature effects in Coriolis mass flow meters for cryogenic, liquid hydrogen (LH2) applications. *Measurement : journal of the International Measurement Confederation*. [Print ed.]. Sep. **2024**, vol. 237, [article no.] 115155, str. 1-13, ilustr. ISSN 0263-2241. [COBISS.SI-ID [200846339](#)]
3. OBID, Štefan, UREVC, Janez, **MOLE, Nikolaj**, HALILOVIČ, Miroslav. Določitev zveze med napetostjo in deformacijo kompozita na podlagi čistega upogibnega stanja nosilca = Stress strain relation determination of composite based on pure bend state of beam. V: SLAVIČ, Janko (ur.), ČESNIK, Martin (ur.). *Kuhljevi dnevi 2020 : zbornik del : spletna izvedba, 24.-25. september 2020*. Ljubljana: Slovensko društvo za mehaniko, **2020**. Str. 127-134, ilustr. ISBN 978-961-93859-5-1. [COBISS.SI-ID [31370755](#)]
4. MARKEŽIČ, Rok, **MOLE, Nikolaj**, NAGLIČ, Iztok, MARKOLI, Boštjan, ŠTURM, Roman. Tool hardness change prediction during high pressure die casting process. V: KRIŽMAN, Alojz (ur.). *Conference proceedings = Zbornik referatov : WFO- Technical Forum and 59th IFC Portorož 2019 = WFO- Technical Forum in 59. IFC Portorož 2019 : The World Foundry Organization Technical Forum and 59th IFC Portorož 2019 : 18-20 September, Portorož, Slovenia*. Ljubljana: Slovenian Foundrymen Society, **2019**. Str. 1-7. ISBN 978-961-94793-0-8. [COBISS.SI-ID [1830239](#)]
5. **MOLE, Nikolaj**, STARMAN, Bojan, MAČEK, Andraž. *Računalniška simulacija dvorednega štančanja lamel z oznako »T-BMW-001-S01_Layont_02-02« : poročilo*. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, **2024**. II, 11 f., graf. prikazi. [COBISS.SI-ID [218397187](#)]