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
Strojništvo - Razvojno raziskovalni program, druga stopnja, magistrski	Mehanika (smer)	1. letnik	2. semester

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

Predavanja	Seminar	Vaje	Klinične vaje	Druge oblike študija	Samostojno delo	ECTS
30		30			65	5

Nosilec predmeta/Lecturer:	Miroslav Halilovič, Nikolaj Mole
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 2. Geometrijsko modeliranje - Volumski model - Ploskovni model - Linijski model	1. Fundamentals of modeling of structures - Geometric model - Physical model - Mathematical model 2. Geometric modeling - Volume model - Surface model - Line 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 volumske koordinate
7. Heksaedrični KE
   - Integracija upoštevajoč naravni koordinatni sistem
   - Integracijske točke - Gaussove integracijska formula
   - Matrični zapis sistema linearnih enačb
8. Tetraedrični KE
   - Integracija upoštevajoč volumske koordinate
   - Integracija upoštevajoč Gaussovo integracijsko formulo
   - Primer reševanja volumskega 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
    - Pogoji za uporabo osnosimetričnih KE
    - Matrični zapis sistema linearnih enačb
    - Vrste obremenitev
    - Prikaz in analiza rezultatov
11. 2D KE za reševanje toplotnih ali mehanskih

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
    - 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

problemov - Pogoji za uporabo 2D KE - Obravnava 2D toplotnega problema - Obravnava ravninsko napetostnega stanja - Obravnava ravninsko deformacijskega stanja - Obravnava genereliziranega 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	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 boudary conditions - Connection of different types of FEs

Temeljna literatura in viri/Readings:

1. O.C. Zienkiewicz, R.L. Tayler, D.D. Fox: The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics, Elsevier, seventh ed., 2014
2. G.R. Liu, S.S. Quek: The Finite Element Method: A practical course, Elsevier, sec. ed., 2014
3. E. Onate: Structural Analysis with the Finite Element Method Linear Statics – Vol. 2. Beams, Plates and Shells, Springer, 2013

Cilji in kompetence:	**Objectives and competences:**
Cilji: 1. Spoznati teoretično ozadje posameznih tipov končnih elemetov, ki se uporabljajo pri računalniški analizi konstrukcij 2. Pridobiti znanje za pripravo numeričnega modela konstrukcije	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

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)	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:	**Intended learning outcomes:**
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.	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	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

in vaje	

Načini ocenjevanja:	Delež/Weight	Assessment:
Teoretične vsebine	50,00 %	Theory
Praktične vsebine	30,00 %	Practical work
Samostojno delo	20,00 %	Coursework

Reference nosilca/Lecturer's references:

Miroslav Halilovič:

1. 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] (tip. 1.01)
2. STARMAN, Bojan, HALILOVIČ, Miroslav, VRH, Marko, ŠTOK, Boris. Consistent tangent operator for cutting-plane algorithm of elasto-plasticity. Computer methods in applied mechanics and engineering, ISSN 0045-7825. [Print ed.], Apr. 2014, vol. 272, str. 214-232. [COBISS.SI-ID 13311515] (tip. 1.01)
3. HALILOVIČ, Miroslav, VRH, Marko, ŠTOK, Boris. NICEh - a higher-order explicit numerical scheme for integration of constitutive models in plasticity. Engineering with computers, ISSN 0177-0667, 2013, vol. 29, issue 1, str. 55-70. [COBISS.SI-ID 11946779] (tip. 1.01)
4. HALILOVIČ, Miroslav, UREVC, Janez, MOLE, Nikolaj, ŠTOK, Boris, JERMAN, Boris, ZUPAN, Samo, HLADNIK, Jurij, KOC, Pino, KALIN, Mitjan. *Preliminary expert evaluation of spent fuel dry storage and crane upgrade modifications documentation for structural, stress and thermal analysis*. Ljubljana: Faculty of Mechanical Engineering, 2018. 266 str. [COBISS.SI-ID 16317723] (tip. 2.13)

Nikolaj Mole:

1. BOBOVNIK, Gregor, KUTIN, Jože, MOLE, Nikolaj, ŠTOK, Boris, BAJSIČ, Ivan. Numerical analysis of installation effects in Coriolis flowmeters : single and twin tube configurations. *Flow measurement and instrumentation*, ISSN 0955-5986. [Print ed.], 2015, vol. 44, str. 71-78. [COBISS.SI-ID 13845531] (tip. 1.01)
2. MOLE, Nikolaj, BOBOVNIK, Gregor, KUTIN, Jože, ŠTOK, Boris, BAJSIČ, Ivan. An improved three-dimensional coupled fluid-structure model for Coriolis flowmeters. *Journal of fluids and structures*, ISSN 0889-9746, 2008, letn. 24, št. 4, str. 559-575. [COBISS.SI-ID 10511643] (tip.1.01)
3. KAVČIČ, Boris, POKORN, Miran, HALILOVIČ, Miroslav, KOC, Pino, ŠTOK, Boris, MOLE, Nikolaj. *Clipping assembly of a document file : European Patent specification EP 1606122 B1, 2008-05-21*. Munich: European Patent Office, 2008. 1 listina, ilustr. [COBISS.SI-ID 9102363]
patentna družina: EP 1606122 A1, 2005-12-21; P-200300067, 2003-03-18; AT396064 (T), 2008-06-15; AU2003235406 (A1), 2004-10-11; DE20321091 (U1), 2005-11-10; DE20380284 (U1), 2005-06-23; SI21455 (A), 2004-10-31; WO2004082961 (A1), 2004-09-30 (tip. 2.24)
4. HALILOVIČ, Miroslav, UREVC, Janez, MOLE, Nikolaj, ŠTOK, Boris, JERMAN, Boris, ZUPAN, Samo, HLADNIK, Jurij, KOC, Pino, KALIN, Mitjan. *Preliminary expert evaluation of spent fuel dry storage and crane upgrade modifications documentation for structural, stress and thermal analysis*. Ljubljana: Faculty of Mechanical Engineering, 2018. 266 str. [COBISS.SI-ID 16317723] (tip. 2.13)
5. BOBOVNIK, Gregor, KUTIN, Jože, MOLE, Nikolaj, ŠTOK, Boris, BAJSIČ, Ivan. Influence of the design parameters on the installation effects in coriolis flowmeters. V: *Flomeko 2013*, The 16th International Flow Measurement Conference, 24-26th September 2013, B7.2 - 236 [COBISS.SI-ID 13132059] (tip. 1.08)