

# OSNOVE MKE ANALIZ

## UČNI NAČRT PREDMETA/COURSE SYLLABUS

<b>Predmet:</b>	Osnove MKE analiz
<b>Course title:</b>	Fundamentals of FEM analysis
<b>Članica nosilka/UL Member:</b>	UL FS

Študijski programi in stopnja	Študijska smer	Letnik	Semestri	Izbirnost
Strojništvo - projektno aplikativni program, prva stopnja, visokošolski strokovni	Konstruiranje strojev in naprav (smer)	2. letnik	2. semester	obvezni

<b>Univerzitetna koda predmeta/University course code:</b>	0563425
<b>Koda učne enote na članici/UL Member course code:</b>	3044-V

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			40	4

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

<b>Izvajalci predavanj:</b>	
<b>Izvajalci seminarjev:</b>	
<b>Izvajalci vaj:</b>	
<b>Izvajalci kliničnih vaj:</b>	
<b>Izvajalci drugih oblik:</b>	
<b>Izvajalci praktičnega usposabljanja:</b>	

**Vrsta predmeta/Course type:**

Izbirni strokovni predmet /Elective specialised 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 Visokošolski strokovni študijski program I. stopnje Strojništvo - Projektno aplikativni program.

Meeting the enrollment conditions for the MECHANICAL ENGINEERING - Project Oriented Applied Programme.

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

1. Postopek reševanja z MKE
  - Priprava geometrijskega modela konstrukcijskega elementa upoštevajoč vrsto obremenjevanja
  - Določitev fizikalnega modela mehanske obremenitve
  - Matematični popis fizikalnega dogajanja
2. Priprava geometrijskega modela
  - Nadomestitev volumskega geometrijskega modela s ploskovnim geometrijskim modelom
  - Nadomestitev volumskega geometrijskega modela z linijskim geometrijskim modelom
  - Obravnavanje primerov iz inženirske prakse
3. Numerično reševanje matematičnega modela
  - Metoda končnih razlik (MKR)
  - Metoda končnih elementov (MKE)
  - Koraki pri reševanju z MKE
4. Mreženje linijskih in ploskovnih konstrukcij s KE
  - Izbira geometrijske oblike KE
  - Mreženje z 1D KE
  - Mreženje z 2D KE
  - Kontrola kvalitete 2D mreže KE
5. Mreženje volumskega območja s KE
  - Mreženje s 3D KE
  - Kontrola kvalitete mreže 3D KE
  - Določitev fizikalnih lastnosti materialov

1. Basic steps of FEM
  - Preparation of the geometric model of the structural element taking into account the type of loading
  - Determination of the physical model of mechanical loading
  - Mathematical description of physical phenomena
2. Preparation of geometric model
  - Replacement of the geometrical volume model with the geometrical surface model
  - Replacement of the geometrical volume model with the geometrical line model
  - Engineering case studies
3. Numerical solution of mathematical model
  - Finite difference method (FDM)
  - Finite element method (FEM)
  - General steps in FEM simulation
4. Mesh generation of line and surface structures by FEs
  - Selection of FE geometry - 3D, 2D or 1D
  - FE mesh generation with 1D FEs
  - FE mesh generation with 2D FEs
  - Quality control of 2D FE mesh
5. Mesh generation of the volume domain by FEs
  - Mesh generation with 3D FEs
  - Quality control of 3D FE mesh
  - Determination of the physical

<ul style="list-style-type: none"> <li>- Določitev geometrijskih lastnosti KE</li> <li>- Določitev začetnih, robnih in obremenitvenih pogojev</li> </ul> <p>6. Aproximacija primarne veličine po območju KE</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Interpolacijske funkcije</li> <li>- Preslikava v naravni koordinatni sistem</li> <li>- Analiza vpliva aproksimacije po območju KE na rezultate izračuna na primerih iz inženirske prakse</li> </ul> <p>7. Osem vozliščni 3D KE</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Značilnosti izoparametričnih 3D KE</li> <li>- Določitev lege integracijskih točk - Gaussova integracijska formula</li> <li>- Matrični zapis sistema linearnih enačb</li> </ul> <p>8. Reševanje 3D problema z MKE</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Primer reševanja volumnskega problema</li> <li>- Načini reševanja sistema linearnih enačb</li> <li>- Prikaz in analiza rezultatov primerov iz inženirske prakse</li> </ul> <p>9. Uporaba 3D KE za reševanje mehanskih problemov</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Določitev števila prostostnih stopenj KE</li> <li>- Točkovna obremenitev</li> <li>- Ploskovna porazdeljena obremenitev</li> <li>- Volumsko porazdeljena obremenitev</li> <li>- Prikaz in analiza rezultatov primerov iz inženirske prakse</li> </ul> <p>10. Uporaba osnosimetričnih KE za reševanje mehanskih problemov</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pogoji za uporabo osnosimetričnih KE</li> <li>- Vrste obremenitev</li> <li>- Prikaz in analiza rezultatov primerov iz inženirske prakse</li> </ul> <p>11. Obravnava mehanskih problemov z 2D KE</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pogoji za uporabo 2D KE</li> <li>- Obravnava ravninsko napetostnega stanja</li> <li>- Obravnava ravninsko deformacijskega stanja</li> </ul> <p>12. Obravnava upogiba plošč z 2D KE</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Zahtevani pogoji za uporabo 2D KE za obravnavo upogiba plošč</li> <li>- Vrste obremenitev</li> </ul>	<p>properties of materials</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Determination of the geometrical properties of FEs</li> <li>- Determination of initial, boundary and loading conditions</li> </ul> <p>6. Approximation of primary variable in FE domain</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Interpolation functions</li> <li>- Mapping to a natural coordinate system</li> <li>- Analysis of the impact of FE domain approximation on the results of computation of engineering case studies</li> </ul> <p>7. 3D eight-node FE</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Characteristics of isoparametric 3D FEs</li> <li>- Determination of the position of integration points - Gaussian quadrature rule</li> <li>- Matrix form of the system of linear equations</li> </ul> <p>8. Solving 3D problem using FEM</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- An example of solving a volume problem</li> <li>- Visualization and analysis of the results of engineering case studies</li> </ul> <p>9. Use of 3D FEs to solve mechanical problems</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Determination of the number of FE DOF</li> <li>- Point load</li> <li>- Area distributed load</li> <li>- Volume distributed load</li> <li>- Visualization and analysis of the results of engineering case studies</li> </ul> <p>10. Use of axisymmetric FEs to solve mechanical problems</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Conditions for use of axisymmetric FEs</li> <li>- Types of loads</li> <li>- Visualization and analysis of the results of engineering case studies</li> </ul> <p>11. Mechanical problem analysis by 2D FEs</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Conditions for the use of 2D FEs</li> <li>- Analysis of plane strain state</li> </ul> <p>12. Bending plate analysis by 2D FEs</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Required conditions for using 2D FEs to analysis plate bending</li> <li>- Types of loads</li> <li>- Visualization and analysis of the</li> </ul>
--	---

<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prikaz in analiza rezultatov primerov iz inženirske prakse</li> </ul> <p>13. Uporaba in posebnosti lupinskih KE za reševanje mehanskih problemov</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Vpeljava lokalnega koordinatnega sistema</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Prikaz in analiza rezultatov primerov iz inženirske prakse upoštevajoč globalni ali lokalni koordinatni sistem</li> </ul> <p>14. Uporaba in posebnosti 1D KE za reševanje mehanskih problemov</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Obravnava enoosno obremenjenih konstrukcijskih elementov</li> <li>- Obravnava upogibno obremenjenih nosilcev</li> <li>- Vrste obremenitev</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Prikaz in analiza rezultatov primerov iz inženirske prakse</li> </ul> <p>15. Pristopi k napredni uporabi MKE pri obravnavi konstrukcij</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Upoštevanje simetričnosti geometrije, robnih pogojev in obremenitev</li> <li>- Povezava različnih tipov KE</li> <li>- Napredno definiranje robnih pogojev</li> <li>- Primeri iz inženirske prakse</li> </ul>	<p>results of engineering case studies</p> <p>13. Use and specifics of shell FEs in mechanical problems solution</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Using of the local coordinate system</li> <li>- Visualization and analysis of the results of engineering case studies considering global or local coordinate system</li> </ul> <p>14. Use and specifics of 1D FEs in mechanical problems solution</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Analysis of uniaxially loaded structural elements</li> <li>- Analysis of bending loaded beams</li> <li>- Types of loads</li> <li>- Visualization and analysis of the results of engineering case studies</li> </ul> <p>15. Approaches to the advanced use of FEM in structural analysis</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Consideration of symmetry of geometry, boundary conditions and loading</li> <li>- Connection of different types of FEs</li> <li>- Advanced definition of boundary conditions</li> <li>- Engineering case studies</li> </ul>
---	---

### Temeljna literatura in viri/Readings:

1. G.R. Liu, S.S. Quek: The Finite Element Method: A practical course, Elsevier, sec. ed., 2014
2. J.N. Reddy: An Introduction to the Finite Element Method, McGraw-Hill, third ed., 2009
3. G.R. Buchanan: Schaum's Outline of Finite Element Analysis, Schaum's Outline Series, 1994

### Cilji in kompetence:

#### Cilji:

1. Spoznati numerično ozadje posameznih tipov končnih elementov, ki se uporabljajo pri računalniški analizi konstrukcij
2. Pridobiti strokovno znanje priprave numeričnega modela konstrukcije
3. Obvladovanje določevanja obremenitvenih pogojev
4. Pridobiti kompetence za prikaz in vrednotenje rezultatov numerične analize

### Objectives and competences:

#### Goals:

1. To know the numerical background of the individual types of finite elements used in the computer analysis of structures
2. To acquire professional knowledge in preparing a numerical model of structure
3. Mastering the determination of load conditions
4. Acquire competencies to display and evaluate the results of numerical

<b>Kompetence:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Obvladovanje numeričnega ozadja metode končnih elementov (S2-PAP + S5-PAP + P2-PAP)</li> <li>2. Strokovna sposobnost priprave optimalnega numeričnega modela konstrukcije (S1-PAP + S2-PAP + P1-PAP + P7-PAP + P8-PAP)</li> <li>3. Prikaz in analiza rezultatov mehanske analize konstrukcij (S1-PAP + P1-PAP)</li> </ol>	<b>analysis</b> <b>Competences:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mastering the numerical background of the finite element method (S2-PAP + S5-PAP + P2-PAP)</li> <li>2. The ability to prepare an optimal numerical model of the structures (S1-PAP + S2-PAP + P1-PAP + P7-PAP + P8-PAP)</li> <li>3. Presentation and analysis of mechanical analyses results (S1-PAP + P1-PAP)</li> </ol>
--	--

### **Predvideni študijski rezultati:**

<b>Znanja:</b> Poglobljeno strokovno teoretično in praktično znanje o računalniško podprti analizi konstrukcij na osnovi metode končnih elementov. <b>Spretnosti:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. S2: Učinkovito numerično modeliranje inženirskih problemov z metodo končnih elementov</li> <li>2. S1.4: Prikaz in analiza rezultatov numeričnega reševanja upoštevajoč specifično posameznega končnega elementa</li> </ol>	<b>Knowledge:</b> In-depth theoretical and practical knowledge of computer aided analysis of structures based on finite element method. <b>Skills:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. S2: Effective numerical modeling of engineering problems with finite element method</li> <li>2. S1.4: Analysis of results of numerical solving taking into account the specificity of each finite element</li> </ol>
--	---

### **Metode poučevanja in učenja:**

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 P8 Izdelava in predstavitev aplikativnih seminarskih nalog P10 Uporaba anket v realnem času P15 Uporaba video vsebin kot priprava na predavanja in vaje	<b>Learning and teaching methods:</b> 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 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:**

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

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

1. STARMAN, Bojan, HALLBERG, Håkan, WALLIN, Mathias, RISTINMAA, Matti, **HALILOVIČ, Miroslav**. Differences in phase transformation in laser peened and shot peened 304 austenitic steel. International journal of mechanical sciences. 2020, vol. 176, str. 1-18, ilustr. ISSN 0020-7403. [COBISS.SI-ID [17043227](#)] (tip. 01)
2. VRH, Marko, **HALILOVIČ, Miroslav**, STARMAN, Bojan, ŠTOK, Boris. A new anisotropic elasto-plastic model with degradation of elastic modulus for accurate springback simulations. International journal of material forming. 2011, vol. 4, no. 2, str. 217-225. [COBISS.SI-ID [11877915](#)] (tip. 1.01)
3. VRH, Marko, **HALILOVIČ, Miroslav**, STARMAN, Bojan, ŠTOK, Boris. Modelling of springback in sheet metal forming. International journal of material forming. 2009, vol. 2, iss. 1, str. 825-828. [COBISS.SI-ID [11286555](#)] (tip. 1.01)
4. MOLE, Nikolaj, **HALILOVIČ, Miroslav**, KOC, Pino. Trdnostna in frekvenčna analiza obstoječega ventilatorja Planica. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za numerično modeliranje in simulacije, mar. 2018. II, 7 [COBISS.SI-ID [16108315](#)] (tip. 2.12)

**Nikolaj Mole:**

1. **MOLE, Nikolaj**, CAFUTA, Gašper, ŠTOK, Boris. A method for optimal blank shape determination in sheet metal forming based on numerical simulations. Strojniški vestnik. Apr. 2013, vol. 59, no. 4, str. 237-250. [COBISS.SI-ID [12737819](#)] (tip. 01)
2. BOBOVNIK, Gregor, KUTIN, Jože, **MOLE, Nikolaj**, ŠTOK, Boris, BAJSIČ, Ivan. Numerical analysis of installation effects in coriolis flowmeters : a case study of a short straight tube full-bore design. Flow measurement and instrumentation, ISSN 0955-5986. [Print ed.], Dec. 2013, vol. 34, str. 142-150. [COBISS.SI-ID [13171739](#)] (tip. 1.01)
3. HALILOVIČ, Miroslav, **MOLE, Nikolaj**, ŠTOK, Boris. Thermo-mechanical modelling of continuous casting primary zones. V: TOPPING, Barry H. V. (ur.), TSOMPANAKIS, Yiannis (ur.). Proceedings, Thirteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, 6-9 September 2011, Crete, Greece, (Civil-comp proceedings, ISSN 1759-3433, 96). Stirlingshire: Civil-Comp Press. cop. 2011, str. [1-18]. [COBISS.SI-ID [11992091](#)] (tip. 1.08)
4. **MOLE, Nikolaj**, HALILOVIČ, Miroslav, KOC, Pino. Trdnostna in frekvenčna analiza obstoječega ventilatorja Planica. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za numerično modeliranje in simulacije, mar. 2018. II, 7 [COBISS.SI-

**Bojan Starman:**

1. **STARMAN, Bojan**, VRH, Marko, KOC, Pino, HALILOVIČ, Miroslav. Shear test-based identification of hardening behaviour of stainless steel sheet after onset of necking. Journal of materials processing technology. Aug. 2019, vol. 270, pg. 335-344. [COBISS.SI-ID [16527899](#)]
2. MAČEK, Andraž, **STARMAN, Bojan**, MOLE, Nikolaj, HALILOVIČ, Miroslav. Calibration of advanced yield criteria using uniaxial and heterogeneous tensile test data. Metals. 2020, iss. 4, vol. 10, pg. 1-17. [COBISS.SI-ID [17170459](#)]
3. **STARMAN, Bojan**, CAFUTA, Gašper, MOLE, Nikolaj. A method for simultaneous optimization of blank shape and forming tool geometry in sheet metal forming simulations. Metals. Apr. 2021, vol. 11, iss. 4, pg. 1-20. [COBISS.SI-ID [57420803](#)]
4. 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, pg. 1957-1971. [COBISS.SI-ID [127300355](#)]
5. HORVAT, Darja, AGREŽ, Vid, POŽAR, Tomaž, **STARMAN, Bojan**, HALILOVIČ, Miroslav, PETKOVŠEK, Rok. Laser-induced shock-wave-expanded nanobubbles in spherical geometry. Ultrasonics Sonochemistry. Sep. 2022, vol. 89, pg. 1-12. [COBISS.SI-ID [122021123](#)]