

FOR THE ACADEMIC-SCIENTIFIC COUNCIL

Subject: Report on the evaluation of the doctoral dissertation of PhD candidate Miloš Jočković

According to the Decision of the Academic-Scientific Council of the Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade No. 22/63-2 from April 22nd 2021, we have been appointed as members of the Committee for evaluation of the doctoral dissertation submitted by the candidate **Miloš Jočković**, MSc. Civil Eng, entitled:

ISOGEOMETRIC APPROACH IN DYNAMIC ANALYSIS OF SPATIAL CURVED BEAMS

The doctoral dissertation is written in English according to the requirements of the international SEEFORM project, under which the part of the presented research has been carried out. The title of the dissertation in Serbian is:

**ИЗОГЕОМЕТРИЈСКИ ПРИСТУП У ДИНАМИЧКОЈ АНАЛИЗИ ПРОСТОРНИХ
КРИВОЛИНИЈСКИХ ГРЕДНИХ НОСАЧА**

After review of the submitted dissertation and other supplementary materials, as well as the discussion with the candidate, the Committee has prepared the following

R E P O R T

1. INTRODUCTION

1.1. Chronology of the approval and the research on the doctoral dissertation

- In 2013 the candidate enrolled the Doctoral studies at the Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, Study Program Civil Engineering.
- May 16th 2019 - during the session of Chair of Engineering Mechanics and Theory of Structures, the candidate presented the topic of the doctoral dissertation entitled “Isogeometric approach in dynamic analysis of spatial curved beams”.
- The Committee nominated by the Chair accepted the proposed topic of the dissertation and suggested the candidate to submit the thesis proposal to the Academic-Scientific Council of the Faculty of Civil Engineering.
- May 16th 2019 - the candidate submitted the proposal of the doctoral dissertation to the Academic-Scientific Council of the Faculty of Civil Engineering in Belgrade.
- May 23rd 2019 - Academic-Scientific Council of the Faculty of Civil Engineering University of Belgrade nominated the following Committee to evaluate the candidate and the application of doctoral dissertation: Prof. Dr.-Ing. Matthias Baitsch, Prof. Dr. Rastislav Mandić and Assoc. Prof. Dr. Marija Nefovska-Danilović (Decision No. 169/4-19 from May 24th 2019).
- September 12th 2019 - Academic-Scientific Council of the Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, accepted the Report of the Committee for evaluation of the candidate

and the doctoral dissertation and sent its decision to the Council of the Civil Engineering and Urbanism of the University of Belgrade for the approval (Decision No. 169/7 from September 16th 2019).

- September 30th 2019 - Council of the Civil Engineering and Urbanism of the University of Belgrade approved the suggested proposal of the doctoral dissertation entitled “Isogeometric approach in dynamic analysis of spatial curved beams” (Decision No. 61206 -/2-19 from September 30th 2019).
- April 15th 2021 - the candidate submitted the final version of the doctoral dissertation for the revision and evaluation.
- April 22nd 2021 - Academic-Scientific Council of the Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, nominated the following Committee for review, evaluation and defense of the doctoral dissertation (Decision No. 22/63-2):

Dr. Marija Nefovska-Danilović, associate professor, University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering,

Prof. Dr.-Ing. Matthias Baitsch, professor, Hochschule Bochum, Bochum University of Applied Sciences

Dr. Rastislav Mandić, retired full professor, University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering,

Dr. Aleksandar Borković, associate professor, University of Banja Luka, Faculty of Architecture, Civil Engineering and Geodesy

Dr. Miroslav Marjanović, assistant professor, University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering

1.2. Scientific field of the dissertation

The dissertation topic belongs to the scientific field Civil Engineering. Scientific sub-field is the Engineering Mechanics and Theory of Structures. Dr Marija Nefovska-Danilović (Associated Professor at the Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade) and Dr.-Ing. Matthias Baitsch (Professor at Hochschule Bochum - Bochum University of Applied Sciences) have been nominated as advisors of the dissertation.

1.3. Biography of the candidate

Miloš Jočković was born on April 6th 1988 in Sremska Mitrovica, Republic of Serbia. He finished elementary school and gymnasium in Šid as a holder of “Vuk Karadžić” diploma.

He enrolled BSc studies at the Faculty of Civil Engineering in Belgrade in 2007 and graduated in 2011 within the module Structures with the average grade 9.54/10. He defended the diploma thesis entitled „Design of reinforced concrete structure of commercial building“ with the highest grade and acquired the title Bachelor of Science. He enrolled master studies at the Faculty of Civil Engineering in Belgrade in 2011 and graduated in 2013 (module Structures) with an average grade 9.57/10. He defended the master thesis entitled „Free vibration of plate assembles using spectral element method“ at the Chair of Engineering Mechanics and Theory of Structures with the highest grade and acquired the title Master of Science.

In 2011 he has been awarded by the Foundation “Prof. Milan Đurić” for excellence in the field of Theory of Structures. In addition, during the period from 2007 to 2011 the Faculty of Civil Engineering in Belgrade continuously awarded him for the results he achieved during the studies. From 2008 to 2010 he was a scholarship holder of the fund of Republic of Serbia, as well as of the Fund for Young Talents of Republic of Serbia -“Dositeja”, from 2010 to 2011.

In 2013 he enrolled the doctoral studies at the Faculty of Civil Engineering in Belgrade. He has passed all exams from the curriculum with the average grade of 9.88/10.

During 2012, Miloš Jočković has been working for the National Oil company NIS, and for Serbia and Montenegro Air Traffic Services - SMATSA LLC.

Since November 2013 he has been working at the Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade as a researcher on the project “Towards Development of Sustainable Cities: Influence of traffic induced vibrations on buildings and humans” (TR36046 lead by Prof. Dr Mira Petronijević). From June 2013 until December 2013 he participated in the Project "Implementing MATLAB tool for analyzing flutter instability" financed by the DAAD foundation – Germany.

Since November 2014 he has been working as Teaching Assistant - PhD Student for the scientific field Engineering Mechanics and Theory of Structures at the Faculty of Civil Engineering in Belgrade. Since the election, he has been teaching exercises in the subjects Matrix Structural Analysis, Finite Element Method and Computer Aided Numerical Structural Analysis and Design. In addition, he was a committee member of several BSc theses at the Chair of Engineering Mechanics and Theory of Structures.

Since 2015, M. Jočković has been participating as the scholarship holder in the international PhD program SEEFORM, financed by DAAD, Germany. As a SEEFORM scholar, he spent five months at Hochschule Bochum (Bochum University of Applied Sciences) supervised by Prof. Dr.-Ing. Matthias Baitsch.

As an author or co-author, Miloš Jočković has published one paper in the international journal (M21), two papers in the international journal (M24), eight papers in the proceedings of international conferences (M33), two papers in the proceedings of national conferences (M63) and four papers in the national monograph.

He is a member of the Serbian Society of Mechanics.

He speaks and writes English.

2. OUTLINE OF THE DISSERTATION

2.1 Content of the dissertation

The doctoral dissertation is written in English. It contains 110 pages, 77 figures and seven tables. Layout of the dissertation has been prepared according to the regulations and guidelines for preparation of doctoral dissertation of the University of Belgrade. The dissertation is divided into nine chapters as follows:

- 1) Introduction;
- 2) Review of previous research;
- 3) NURBS functions;
- 4) Differential geometry;
- 5) Linear dynamic formulation of spatial Bernoulli-Euler beam;
- 6) Geometrically nonlinear dynamic formulation of the plane Bernoulli-Euler beam;
- 7) Object-oriented computer program;
- 8) Numerical examples;
- 9) Conclusions and recommendations for future work.

Moreover, the dissertation contains abstract both in English and Serbian as well as the biography of the candidate. The Bibliography includes 62 references.

2.2 Brief overview of chapters

In the Introduction, the research topic has been presented as well as the main idea behind the isogeometric approach in the numerical analysis of structures. Advantages of the isogeometric approach in comparison to the nowadays widely used finite element method (FEM) have been explained, with regard to discretization, choice of basis functions, computational time, accuracy and reliability of the results. In addition, basic assumptions of the Bernoulli-Euler beam theory were presented. Afterwards, advantages of the application of Bernoulli-Euler beam elements in comparison to the Timoshenko beam elements have been highlighted, in terms of number of degrees of freedom (DOFs) and elimination of the shear locking phenomenon. Subsequently, having in mind that the implementation of modern materials and aesthetic requirements during design process have made the structures slender and more sensitive to both time and spatially dependent dynamic loads, the influence of the moving mass has been elaborated. In most cases, moving mass is modelled using force with constant magnitude and direction, which changes its position along the structure with time. Using this model, the inertial term generated by the moving mass is neglected. However, for a mass moving with a certain speed the inertial term should be taken into account. At the end, the aim of the research within the dissertation has been formulated as development of the numerical model of spatial curved

Bernoulli-Euler beam subjected to spatially varying dynamic load using isogeometric approach, considering both small and finite displacements and rotations. As the result, the isogeometric beam element has been developed using basic principles of continuum mechanics and differential geometry.

The literature review has been presented in the second chapter. First, a historical overview of the isogeometric analysis and NURBS basis functions has been presented. Afterwards, the research in the field of isogeometric analysis of beams has been given. It has been concluded that most of the previous research dealt with Timoshenko beams. In addition, it has been pointed out that such models have demonstrated low efficiency in the analysis of slender beams due to the shear locking phenomenon. In the case of finite displacements and rotations, geometrically nonlinear analysis should be applied. Hereafter, research in the field of geometrically nonlinear analysis of beams has been presented. In most of studies, beams have been modelled using Timoshenko theory and subjected to static loads. These problems have been solved using the FEM. At the end of chapter, the overview of studies dealt with the effect of both spatially and time varying loads on the dynamic response of beam structures has been elaborated. Moving mass induces moving load, which is commonly modelled as moving force with constant magnitude and direction, while the inertial term of the moving mass is neglected. However, in some cases, the effect of the inertial term of the moving mass can significantly affect the response of structure and thus cannot be neglected (moving mass model). In previous studies only plane straight beams subjected to moving dynamic load have been analyzed using isogeometric approach, while spatial curved beams subjected to moving dynamic load have been studied using the FEM or semi-analytical methods.

In the third chapter, the NURBS basis functions have been presented. Explanation of a knot vector, control points, as well as properties and advantages of NURBS functions in geometry representation of curves have been given. At the end of the chapter, the refinement procedures of NURBS parametrized curves were explained and their effect on the shape of curves was shown.

In the fourth chapter, basic concepts of differential geometry are given, which will be applied in the following chapters for the formulation of the isogeometric element of spatial curved Bernoulli-Euler beam. In addition, the NURBS parametrization and introduction of the ξ_λ frame of reference, which has demonstrated high efficiency for Bernoulli-Euler beam formulation, have been elaborated.

The fifth chapter deals with the linear dynamic formulation of the spatial curved Bernoulli-Euler beam element using isogeometric approach. Displacement, velocity and acceleration field have been defined using the NURBS parametrization explained in the previous chapter. The degrees of freedom of isogeometric elements based on Bernoulli-Euler theory are displacements and torsional rotation of the control points. Based on the kinematic and constitutive relations and applying basic principles of continuum mechanics, the strong and weak form of the problem have been formulated. Governing equations of motion of spatial curved beam have been developed applying the weak form, and corresponding stiffness and mass matrices were obtained. Afterwards, explicit direct integration scheme has been applied to solve the equations of motion due to dynamic load. Finally, moving force model and moving mass model have been introduced for modelling of spatially dependent dynamic load, which will be used later in the numerical simulations.

Theoretical considerations of the behavior of Bernoulli-Euler beam element concerning geometrically nonlinear formulation have been presented in the sixth chapter. Starting from the beam's deformed configuration, displacement, velocity and acceleration field has been defined. In the displacement field, the product of the velocity gradient components, as well as the product between the velocity gradient components and the angular velocity vector component were assumed negligible. Finally, the equations of motion have been developed and explicit integration scheme has been applied.

Based on the theoretical considerations presented in the fifth and sixth chapter, the object-oriented computer program has been developed. Explanation of the defined classes together with their properties and methods has been provided. At the end, the class diagram model has been depicted.

Numerical examples that illustrate isogeometric formulation and implementation of the developed computer program were presented in the eighth chapter. The following examples have been analyzed: free vibration study of a spatial curved beam, linear and geometrically nonlinear analysis of curved beams subjected to spatially varying dynamic load. A detailed parametric study has been carried out to highlight the effects of boundary conditions, type of the applied dynamic load, its magnitude and velocity on the dynamic response. Verification of the proposed isogeometric formulation and the developed computer program has been carried out through a comprehensive comparative analysis using numerical benchmark examples from the literature and results obtained using the FEM-based commercial software Abaqus. Special attention has been paid to

the refinement procedures in the isogeometric analysis (*h*-, *p*- and *k*-refinement), considering the number of unknowns and computational time.

In the last chapter, main conclusions drawn from the research presented in the dissertation have been highlighted, as well as the recommendations and guidelines for future research in this field.

3. ASSESMENT OF THE DISSERTATION

3.1. Originality

Besides aesthetic requirements during design process, implementation of modern materials has made the structures slender and more sensitive to the dynamic loads. Therefore, development of numerical procedures for efficient and accurate analysis of such structures is of great importance. Isogeometric approach is relatively new and modern research field, which has broad application in the numerical analysis of structures. There are many advantages of the isogeometric approach with respect to conventional FEM, which are primarily related to the simple and accurate geometrical representation of complex curvilinear structures by using the NURBS functions and Computer Aided Design (CAD) software.

Previous studies using isogeometric approach have been mainly focused on static, stability and dynamic analysis of plates and shells, while one-dimensional structures have been studied using isogeometric beam elements based on Timoshenko theory. In addition, for slender beams, the application of Bernoulli-Euler theory was found to be more adequate. Doctoral dissertation of the candidate Miloš Jočković represents original scientific contribution in the field of application of isogeometric approach in linear and geometrically nonlinear dynamic analysis of spatial curved Bernoulli-Euler beams. The candidate developed the isogeometric curved beam element using basic principles of continuum mechanics and differential geometry. The developed beam element has been implemented in the object-oriented computer program using MATLAB, which enables dynamic response analysis of spatial curved beams subjected to moving dynamic load. It has been demonstrated that the proposed approach is more efficient and more convenient for application in the analysis of curved elements in comparison with FEM, both from the aspect of accuracy and computational time.

3.2. Assessment of the references and used literature

In the doctoral dissertation, the candidate studied the relevant literature. He has cited 62 references relevant for the topic of the dissertation. The candidate has referred to the existing literature in his work properly. Approximately 50% of the references cover the research results published in the last 10 years. Most of the references are papers published in the prestigious international journals such as *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, *Applied Mathematical Modelling* and *Journal of Sound and Vibration*.

3.3. Description and adequacy of applied scientific methods

Besides general scientific methods such as collection and review of the existing literature and synthesize the conclusions, the candidate applied specific scientific methods related to the numerical modelling of spatial curved beam elements: basic principles of differential geometry, continuum mechanics and isogeometric method. Moreover, numerical methods for free vibration study and numerical explicit integration of the governing equations of motion have been used as well. The comparison of the results obtained using the proposed approach has been achieved using the finite element-based software, while the convergence study has been carried out using three different refinement methods (*h*-, *p*- and *k*-refinement). The candidate has also applied the object-oriented programming in MATLAB and developed the original computer program. To conclude, the candidate applied adequate scientific methods as well as contemporary numerical techniques to reach the goals defined in the dissertation.

3.4. Applicability of the achieved results

Efficient and fast analysis of spatial curved beams is important in both theoretical and practical sense. Generally, using classical methods, both the time and resources necessary to obtain accurate results are increasing in relation to the complexity of the structural geometry, type of load and analysis. Using isogeometric approach, geometry representation is carried out in a relatively simple way. Unlike the FEM, refinement procedures are carried out in the parametric domain, without changing the initial geometry of the structure in the physical domain. Moreover, using Bernoulli-Euler beam theory, the number of the degrees of

freedom is reduced in comparison to the classical formulations of beam elements, which also contributes to the efficiency of the proposed procedure especially in the dynamic analysis. Using the developed computer program a wide range of vibration studies of Bernoulli-Euler curved beams subjected to time and spatially varying dynamic load could be performed.

3.5. Evaluation of competencies of the candidate for independent scientific research

During the PhD studies, the candidate gained substantial independence in scientific research in the process of his PhD research, as well as during the courses he took at the Faculty, his activities in the SEEFORM program, study visits at *Hochschule Bochum*, the current publication record and participation at national and international conferences. In addition, the candidate has demonstrated the ability to critically analyze the existing knowledge in the field and to develop novel isogeometric spatial curved Bernoulli-Euler beam element, based on the defined hypotheses and applied methods. The isogeometric approach has proven to be more efficient and more accurate in dynamic studies in comparison to the existing solutions.

To conclude, the candidate has confirmed his scientific maturity and an exceptional research potential.

4. SCIENTIFIC CONTRIBUTION OF THE DISSERTATION

4.1. Review of achieved scientific contributions

Main scientific contributions of the dissertation are:

1. Development of curved Bernoulli-Euler beam element using isogeometric approach and its application in the geometrically nonlinear dynamic analysis of beams subjected to moving load,
2. Development of object-oriented computer program for numerical linear and geometrically nonlinear analysis of curved beams using isogeometric approach,
3. Systematization of previous knowledge in the research field, as well as synthesis of new results and knowledge, which should contribute to further development and practical application of the isogeometric approach in dynamic analysis.

4.2. Critical analysis of the research results

Within the doctoral dissertation, the candidate developed numerical model based on the isogeometric approach for linear and geometrically nonlinear dynamic analysis of Bernoulli-Euler curved beam elements and showed the efficiency of the developed model in comparison to the FEM. Moreover, the number of degrees of freedom was reduced in comparison to the classical formulations of beam elements, which also contributed to the efficiency of the proposed procedure. Compared to FEM, the advantages of the applied isogeometric approach are high accuracy and reliability, simple discretization and the reduced computational time. Based on the methods and computer program developed in the dissertation, the effects of moving dynamic load can be taken into account. Moreover, the proposed method enables more accurate computation of the dynamic response of curved beam elements. The obtained results were verified through examples from the literature as well as using FEM.

The applicability of the results and the developed computer program in engineering practice is great, because the model enables more efficient analysis of curvilinear beams under the action of moving dynamic load. Part of the research results within the dissertation were published in a prestigious international SCI listed journal.

The results presented in the dissertation represent an excellent starting point for future research, primarily on the formulation of new elements and their implementation in a computer program, the impact of friction between the beam element and the moving mass, as well as stability analysis.

4.3. Verification of scientific contributions

During his research the candidate published the following papers in the field of the PhD research:

Category M21:

1. **Jočković M**, Radenković G, Nefovska-Danilović M, Baitsch M, (2019): Free vibration analysis of spatial Bernoulli-Euler and Rayleigh curved beams using isogeometric approach, Applied Mathematical Modelling 71, 152 – 172 (IF 3,633).

Category M33:

2. **Jočković M**, Nefovska-Danilović M, Free vibration analysis of beam element using isogeometric analysis, Contemporary achievements in Civil Engineering, 22.04.2016, Subotica, Serbia, 269 – 278. (ISBN 978-86-80297-63-7)
3. **Jočković M**, Baitsch M, Nefovska-Danilović M, Free vibration analysis of curved Bernoulli-Euler beam using isogeometric analysis, 5th International Congress of Serbian Society of Mechanics, 19.06.2017 – 21.06.2017, Tara, Serbia, S 1 – 10. (ISBN 978-86-909973-6-7)
4. **Jočković M**, Radenković G, Nefovska-Danilović M, Free vibration analysis of curved spatial Bernoulli-Euler beam with circular cross section using isogeometric approach. 7th International Congress of Serbian Society of Mechanics, 24.06.2019 – 26.06.2019, Sremski Karlovci, Serbia S4a 1 – 10. (ISBN 978-86-909973-7-4)
5. **Jočković M**, Nefovska-Danilović M, Isogeometric based dynamic analysis of Bernoulli Euler curved beam subjected to moving load, International Conference on Contemporary Theory and Practice in Construction XIV Stepgrad (2020), 63 – 70. (ISSN 2566-4484)

Category M45:

6. **Jočković M**, Radenković G, Nefovska-Danilović M, (2019): Izogeometrijski pristup u analizi slobodnih vibracija prostornih Bernuli – Ojlerovih grednih nosača, Teorija građevinskih konstrukcija, Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, Univerzitet Crne Gore – Građevinski fakultet, Akademija inženjerskih nauka Srbije, 47 – 54.

5. CONCLUSION AND RECOMMENDATION

Based on previously exposed facts of the submitted doctoral dissertation, and evaluation in regards to fulfillment of the tasks and the goals of the research, applied methodology, scientific contribution and obtained results, it can be concluded that the doctoral dissertation entitled “Isogeometric approach in dynamic analysis of spatial curved beams” represents a significant and original scientific contribution and proves that the candidate **Miloš Jočković** is capable to perform independent scientific research. The quality of the research is confirmed by the fact that the results of the dissertation were published in the prestigious international journal. Therefore, scientific contribution of the candidate Miloš Jočković is significant in the field of isogeometric analysis of beams.

Within the dissertation, the candidate developed the isogeometric Bernoulli-Euler beam element and formulated the numerical model for dynamic analysis of curved beams subjected to moving load, which considerably contributed to the field of isogeometric dynamic analysis of curved beams. Based on theoretical considerations, the candidate developed computer program, which has been verified through several numerical examples.

Based on the above facts, the Committee suggests to the Academic-Scientific Council of the Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, to accept the doctoral dissertation of the candidate Miloš Jočković entitled “Isogeometric approach in dynamic analysis of spatial curved beams” and send it to the Council of the Civil Engineering and Urbanism of the University of Belgrade for final approval of the public defense.

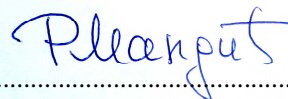
COMMITTEE MEMBERS



.....
Assoc. Prof. Dr. Marija Nefovska-Danilović,
University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering



.....
Prof. Dr.-Ing. Matthias Baitsch,
Hochschule Bochum, Bochum University of Applied Sciences



.....
Prof. Dr. Rastislav Mandić (Retd.),
University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering



.....
Assoc. Prof. Dr. Aleksandar Borković,
University of Banja Luka, Faculty of Architecture, Civil
Engineering and Geodesy



.....
Assist. Prof. Dr. Miroslav Marjanović
University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Извештај о урађеној докторској дисертацији кандидата Милоша Јочковића

Одлуком Наставно-научног већа Грађевинског факултета Универзитета у Београду бр. 22/63-2 од 22.04.2021. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Милоша Јочковића, маг.инж.грађ. под насловом:

ISOGEOMETRIC APPROACH IN DYNAMIC ANALYSIS OF SPATIAL CURVED BEAMS

Докторска дисертација је написана на енглеском језику у складу са условима међународног пројекта SEEFORM у оквиру кога је дисертација урађена. Наслов дисертације на српском језику гласи:

ИЗОГЕОМЕТРИЈСКИ ПРИСТУП У ДИНАМИЧКОЈ АНАЛИЗИ ПРОСТОРНИХ КРИВОЛИНИЈСКИХ ГРЕДНИХ НОСАЧА

После прегледа достављене дисертације, других пратећих материјала и разговора са кандидатом, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

- 2013. године кандидат је уписао Докторске академске студије на Грађевинском факултету Универзитета у Београду, на студијском програму Грађевинарство.
- 16.05.2019. године на седници Катедре за техничку механику и теорију конструкција кандидат је изложио предложену тему докторске дисертације под насловом „Изогеометријски приступ у динамичкој анализи просторних криволинијских гредних носача“.
- Комисија коју је образовало Веће катедре прихватила је тему докторске дисертације и предложила кандидату да тему пријави Наставно-научном већу Грађевинског факултета.
- 16.05.2019. године кандидат је пријавио тему докторске дисертације Наставно-научном већу Грађевинског факултета у Београду.
- 23.05.2019. године Наставно-научно веће Грађевинског факултета у Београду именовало је Комисију за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидата у саставу: Prof. Dr.-Ing. Matthias Baitsch, проф. др Растислав Мандић и в. проф. др Марија Нефовска Даниловић (Одлука бр. 169/4-19 од 24.05.2019).
- 12.09.2019. године Наставно-научно веће Грађевинског факултета у Београду прихватило је извештај Комисије за оцену подобности теме и кандидата докторске дисертације и своју одлуку доставило Већу научних области грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду на давање сагласности (Одлука бр. 169/7 од 16.09.2019).

- 30.09.2019. године Веће научних области грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације под насловом „Изогеометријски приступ у динамичкој анализи просторних криволинијских гредних носача“ (Одлука бр. 61206 -/2-19 од 30.09.2019).
- 15.04.2021. докторска дисертација је предата на преглед и оцену.
- На седници одржаној 22.04.2021. године (Одлука бр. 22/63-2) Наставно-научно веће Грађевинског факултета Универзитета у Београду именовало је Комисију за оцену и одбрану докторске дисертације у следећем саставу:

др Марија Нефовска-Даниловић, ванредни професор, Универзитет у Београду, Грађевински факултет,

Prof. Dr.-Ing. Matthias Baitsch, професор, Hochschule Bochum, Bochum University of Applied Sciences

др Растислав Мандић, редовни професор у пензији, Универзитет у Београду, Грађевински факултет,

др Александар Борковић, ванредни професор, Универзитет у Бањој Луци, Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет,

др Мирослав Марјановић, доцент, Универзитет у Београду, Грађевински факултет.

1.2. Научна област дисертације

Дисертација кандидата Милоша Јочковића припада научној области Грађевинарство, ужа научна област Техничка механика и теорија конструкција. За коменторе дисертације одређени су др Марија Нефовска-Даниловић, ванредни професор Грађевинског факултета Универзитета у Београду, и Prof. Dr.-Ing. Matthias Baitsch, професор на Hochschule Bochum, Bochum University of Applied Science.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Милош Јочковић рођен је 06.04.1988. године у Сремској Митровици, Република Србија. Основну школу и гимназију, општи смер, завршио је у Шиду, обе као носилац дипломе „Вук Караџић“.

Основне академске студије на Грађевинском факултету у Београду уписао је школске 2007/08. године, а дипломирао је 2011. године на модулу Конструкције, са просечном оценом 9,54. Синтезни рад из области бетонских конструкција под насловом „Пројекат конструкције пословне зграде По + П + 10“ одбранио је са оценом 10 (десет) и тиме стекао звање дипломираног инжењера грађевинарства. Дипломске академске (мастер) студије на Грађевинском факултету у Београду уписао је школске 2011/2012. године, а дипломирао је 2013. године на модулу Конструкције, са просечном оценом 9,57. Мастер рад под насловом „Слободне вибрације система плоча применом Методе спектралних елемената“ одбранио је на Катедри за техничку механику и теорију конструкција са оценом 10 (десет) и тиме стекао звање мастер инжењера грађевинарства.

Године 2011. награђен је из Фонда „Проф. Милан Ђурић“ за постигнуте резултате из групе предмета Теорија конструкција. Осим тога, у периоду од 2007. до 2011. године похваљиван је од стране Грађевинског факултета за постигнуте резултате током студија. Од 2008. до 2010. године био је стипендиста Републике Србије, а од 2010. до 2011. године стипендиста Фонда за младе таленте Републике Србије – фондације "Доситеја".

Докторске академске студије на Грађевинском факултету у Београду уписао је школске 2013/2014. године. Положио је све испите предвиђене наставним планом са просечном оценом 9,88.

Милош Јочковић рад у струци започиње 2012. године у Нафтној индустрији Србије, након чега се запошљава у Контроли летења Србије и Црне горе – SMATSA.

Рад на Грађевинском факултету започиње у новембру 2013. године као истраживач приправник на научном пројекту „Истраживање дејства вибрација на људе и објекте у циљу одрживог развоја градова“ (евиденциони број: ТР 36046, руководилац проф. др Мира Петронијевић). У периоду од јуна

2013. до децембра 2013. године учествује на пројекту “Implementing MATLAB tool for analysing flutter instability“ који је финансиран од стране DAAD – Немачка.

Од новембра 2014. године запослен је на Грађевинском факултету Универзитета у Београду у звању асистента - студента докторских студија за ужу научну област Техничка механика и теорија конструкција. Од избора у звање асистента – студента докторских студија држи вежбања из предмета Матрична анализа конструкција, Метод коначних елемената и Примена рачунара у пројектовању конструкција. Поред тога, био је члан комисија за одбрану дипломских радова на Катедри за техничку механику и теорију конструкција.

Од 2015. године као стипендиста учествује у међународном програму SEEFORM, који финансира DAAD, Немачка. У оквиру тог програма је провео 5 месеци на студијском боравку у Немачкој на Hochschule Bochum (Bochum University of Applied Sciences), под менторством Prof. Dr.-Ing. Matthias Baitsch-a.

Милош Јочковић је као аутор или коаутор до сада објавио један научни рад у међународном часопису на SCI листи (M21), два рада у међународном научном часопису (M24), осам радова у зборницима међународних научних скупова (M33), два рада у зборницима скупова националног значаја (M63) и четири рада у монографијама националног значаја (M45).

Члан је Српског друштва за механику.

Говори и пише енглески језик.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1 Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата Милоша Јочковића написана је на енглеском језику, на 110 страна. Садржи 77 слика и седам табела. Дисертација је у обликована у складу са важећим Правилником о докторским студијама на Универзитету у Београду. Дисертација садржи девет поглавља:

- 1) Увод;
- 2) Преглед претходних истраживања;
- 3) NURBS функције;
- 4) Диференцијална геометрија;
- 5) Линеарна формулација динамичке анализе просторне Бернули-Ојлерове греде;
- 6) Геометријски нелинеарна формулација динамичке анализе равне Бернули-Ојлерове греде;
- 7) Објектно-орјентисани рачунарски програм;
- 8) Нумерички примери;
- 9) Закључци и препоруке за будући рад.

Поред тога, дисертација садржи резиме на српском и енглеском језику, као и биографију кандидата. Списак литературе садржи 62 референце.

2.2 Кратак приказ појединачних поглавља

У првом, уводном поглављу објашњен је предмет истраживања. Приказана је основна идеја изогеометријског приступа у нумеричкој анализи грађевинских конструкција. Наведене су предности изогеометријског приступа у односу на у пракси веома заступљену методу коначних елемената (МКЕ) са аспекта дискретизације, избора базних функција, времена потребног за прорачун, као и тачности и поузданости резултата. Затим су дате основне претпоставке теорије Бернули-Ојлерове греде и истакнуте предности примене Бернули-Ојлерових гредних елемената у односу на гредне елементе засноване на Тимошенковој теорији, у погледу избора непознатих параметара у чворовима и елиминације феномена *shear locking*. С обзиром да су употреба савремених материјала и естетски захтеви приликом пројектовања довели до појаве витких гредних конструктивних елемената који су изузетно осетљиви на дејство просторно и временски променљивог динамичког оптерећења, у наставку је објашњен модел динамичког оптерећења који у обзир узима утицај масе која се креће. У већини истраживања, утицај покретне масе на конструкцију замењује се концентрисаном силом константног интензитета, правца и смера, која мења свој положај на конструкцији током времена. Оваквим приступом занемарен је инерцијални утицај покретне масе на конструкцији који је настао

као последица кретања масе по својој трајекторији. Показано је да тај утицај за одређене конструкције при одређеним брзинама кретања масе није заменарљив и да се мора узети у обзир приликом анализа. На крају, формулисан је циљ дисертације као примена изогометријског приступа у динамичкој анализи просторних криволинијских греда у условима линеарне и геометријски нелинеарне анализе, на основу чега је развијен изогометријски гредни елемент користећи основне принципе механике континуума и диференцијалне геометрије.

У другом поглављу дат је преглед литературе. Прво је дат историјски преглед развоја изогометријске анализе и NURBS (енг. *Non-uniform rational basis spline*) базних функција, након чега су приказана истраживања у области изогометријске анализе гредних носача. Закључено је да је већина истраживања била заснована на моделу Тимошенкове греде, као и да су се такви модели показали неефикасним у анализи витких гредних елемената због појаве *shear locking*-а. У условима великих померања и ротација, неопходна је примена геометријски нелинеарне анализе и формулације. У наставку поглавља су приказана истраживања у области геометријски нелинеарне анализе гредних носача. Већина тих истраживања била је заснована на Тимошенковој теорији и примени МКЕ при дејству статичког оптерећења. На крају, дат је преглед истраживања утицаја временски и просторно променљивог динамичког оптерећења на динамички одговор гредних носача. Покретно оптерећење је изазвано кретањем масе по конструкцији и као такво се често замењује силом константног интензитета, правца и смера (модел силе). Приликом оваквог моделирања покретног оптерећења занемарује се инерцијални члан од покретне масе чији је утицај на конструкцију у неким случајевима значајан, па је потребно користити модел који ће овај ефекат узети у обзир (модел покретне масе). Изогометријски приступ у анализи утицаја покретног оптерећења на конструкцију у досадашњим истраживањима био је фокусиран на раванске праволинијске елементе, док је анализа утицаја од покретног оптерећења на просторним или криволинијским елементима вршена помоћу МКЕ или применом полуаналитичких поступака.

У трећем поглављу дат је приказ NURBS базних функција. Дефинисани су основни појмови (тзв. *knot* вектор, контролне тачке), особине NURBS базних функција, као и предност њихове примене приликом дефинисања геометрије просторних кривих линија. У наставку су објашњене основне методе прогушћења које се користе приликом NURBS параметризације кривих линија, као и њихов утицај на тачност геометрије просторних кривих линија.

У наредном, четвртном поглављу приказани су основни појмови из диференцијалне геометрије, на основу којих ће у наредном поглављу бити формулисан изогометријски елемент просторне криволинијске Бернули-Ојлерове греде. У наставку поглавља објашњена је NURBS параметризација и имплементација референтног система који се показао веома ефикасним у формулацији Бернули-Ојлеровог изогометријског гредног елемента.

У петом поглављу прво је приказана формулација изогометријског Бернули-Ојлеровог гредног елемента у условима линеарне динамичке анализе. Поље померања, брзина и убрзања дефинисани су користећи NURBS параметризацију која је објашњена у четвртном поглављу. За основне непознате величине усвојене су компоненте померања и торзиона ротација у контролним тачкама. Затим су на основу кинематичких и конститутивних релација, користећи основне принципе механике континуума, формулисане *strong* и *weak* форма проблема. На основу *weak* форме, изведене су једначине кретања просторне криволинијске греде, као и матрица крутости и конзистентна матрица маса. У наставку, објашњена је експлицитна метода решавања једначина кретања при дејству динамичког оптерећења. На крају, објашњена су два модела (модел покретне силе и модел покретне масе) просторно и временски променљивог оптерећења која ће касније бити коришћена у нумеричким анализама.

Формулација Бернули-Ојлеровог гредног елемента у условима геометријски нелинеарне анализе приказана је у шестом поглављу. Полазећи од деформисане конфигурације гредног елемента, дефинисано је поље померања, а затим и поље брзина и убрзања. Приликом дефинисања поља убрзања, занемарени су производи градијента брзина, као и производ компонената градијента брзина и угаоних брзина. У наставку поглавља изведене су једначине кретања и имплементирана је експлицитна схема интеграције за њихово решавање.

На основу теоретских разматрања приказаних у петом и шестом поглављу, у седмом поглављу описан је објектно-орјентисан рачунарски програм који је кандидат самостално развио у склопу израде докторске дисертације. Наведене су класе које су развијене са одговарајућим особинама и методама. На крају је дат дијаграм међусобних релација појединих класа.

У осмом поглављу приказани су нумерички примери којима су илустроване теоретске поставке и имплементација развијеног рачунарског програма. Редом су разматрани: слободне вибрације просторне криволинијске греде, линеарна динамичка анализа просторне криволинијске греде и геометријски нелинеарна динамичка анализа криволинијске греде при дејству временски променљивог покретног оптерећења. У динамичкој анализи извршена је опсежна параметарска анализа утицаја граничних услова, модела покретног оптерећења, његовог интензитета и брзине на динамички одговор. Поређењем са постојећим нумеричким примерима из литературе и решењима добијеним применом комерцијалног програма ABAQUS, урађена је верификација предложене формулације и развијеног програма. Посебна пажња је посвећена конвергенцији решења коришћењем различитих техника прогушења у изогометријској анализи (тзв. *h*-, *p*- и *k-refinement*), са посебним освртом на број непознатих у анализи и времену потребном за прорачун.

У последњем, деветом поглављу дати су закључци који су проистекли из дисертације, да би на крају биле истакнуте препоруке и смернице за будући рад у овој области.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Поред естетских захтева приликом пројектовања, употреба савремених материјала довела је до појаве витких конструкција које су изузетно осетљиве на дејство динамичког оптерећења. Због тога је важно формулисати одговарајуће нумеричке поступке за ефикасну и брзу анализу у таквим случајевима. Изогометријски приступ представља релативно нову и веома актуелну област која данас има све ширу примену у нумеричкој анализи конструкција. У поређењу са класичном МКЕ има бројних предности, које се пре свега огледају у веома једноставној формулацији сложене геометрије криволинијских конструкција засноване на *Computer Aided Design (CAD)* програмима који користе *NURBS* функције.

Досадашња истраживања примене изогометријског приступа већином су била фокусирана на површинске конструктивне елементе (плоче, љуске) како у статичким, тако и у динамичким анализама и анализама стабилности конструкција, док је изогометријска анализа линијских елемената углавном била заснована на Тимошенковој теорији. Код витких гредних елемената погоднија за примену је Бернули-Ојлерова теорија. Докторска дисертација кандидата М. Јочковића представља оригиналан научни допринос у области примене изогометријског приступа у динамичкој анализи просторних криволинијских гредних елемената заснованих на Бернули-Ојлеровој теорији. У оквиру дисертације, кандидат је развио изогометријски криволинијски гредни елемент користећи основне принципе механике континуума и диференцијалне геометрије, у условима малих и великих померања и ротација. Развијени елемент имплементиран је у објектно-орјентисан рачунарски програм у MATLAB-у, који пружа могућност динамичке анализе просторних криволинијских гредних елемената при дејству покретног динамичког оптерећења. Показано је да је овакав приступ ефикаснији и погоднији за примену код просторних криволинијских елемената у поређењу са МКЕ, како са аспекта тачности, тако и са аспекта времена потребног за прорачун.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Током израде докторске дисертације кандидат је проучио релевантну литературу и навео је 62 референце које су од значаја за област којом се дисертација бави. Кандидат се адекватно позивао на постојећу литературу током израде рада. Око 50% референци чине радови у којима су приказани резултати истраживања у последњих 10 година. Већину референци чине радови објављени у врхунским међународним часописима као што су *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, *Applied Mathematical Modelling* и *Journal of Sound and Vibration*.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Поред општих научних метода истраживања које се односе на прикупљање и преглед литературе и синтезу закључака, у докторској дисертацији кандидат је користио специфичне научне методе, које се тичу нумеричког моделирања просторних криволинијских гредних елемената као што су основни принципи диференцијалне геометрије, механике континуума и изогометријске методе. Поред тога,

коришћени су и нумерички поступци за анализу слободних вибрација и нумеричку интеграцију једначина кретања применом експлицитне методе. За потребе поређења резултата сопствених истраживања, коришћена је метода коначних елемената, док је оцена конвергенције резултата извршена применом три различите методе прогушћења (*h*-, *p*- и *k-refinement*). Кандидат је користио методе објектно-орјентисаног програмирања у MATLAB-у и развио оригинални рачунарски програм. Може се рећи да је кандидат адекватно комбиновао сложене теоријске и нумеричке методе како би остварио циљеве дисертације.

3.4. Применљивост остварених резултата

Ефикасна и брза анализа просторних криволинијских гредних елемената важна је не само из теоријских већ и из практичних разлога. Наиме, употребом класичних метода прорачуна оваквих конструкција, време и ресурси потребни за добијање тачних резултата прорачуна расту у односу на сложеност геометрије конструкције, врсте оптерећења и анализе. Изогеометријским приступом описивање геометрије просторног гредног елемента изводи се на релативно једноставан начин, при чему се не нарушава геометрија носача у физичком домену, као што је случај код класичне МКЕ. Поред тога, употребом изогеометријског приступа значајно је смањен број степени слободе конструкције неопходан за тачне резултате, што је нарочито битно у динамичким анализама. Потенцијалне примене предложеног модела Бернули-Ојлерове криволинијске греде односе се на решавање различитих проблема вибрација ових греда при дејству временски и просторно променљивог динамичког оптерећења, коришћењем развијеног рачунарског програма у MATLAB-у.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самосталан научни рад

Током докторских студија, кандидат је стекао самосталност у научном раду кроз полагање испита, активно учешће на SEEFORM семинарима, студијске боравке на *Hochschule Bochum*, припрему и израду докторске дисертације, публикавање радова и учешћа на међународним и домаћим конференцијама. Кандидат је такође показао способност да критички анализира научну литературу и да на основу постављених хипотеза и избора одговарајућих метода развије нови елемент просторне криволинијске Бернули-Ојлерове греде користећи изогеометријски приступ, који се у динамичкој анализи оваквих проблема показао ефикаснијим и тачнијим у односу на досадашња публикована решења. Све то потврђује научну зрелост и истраживачки потенцијал кандидата Милоша Јочковића.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Основни научни доприноси у дисертацији су:

1. Развој Бернули-Ојлеровог криволинијског гредног елемента применом изогеометријског приступа и његова примена у геометријски нелинеарног динамичкој анализи при дејству покретног оптерећења,
2. Развој програма за нумеричку линеарну и геометријски нелинеарну динамичку анализу криволинијских гредних елемената применом изогеометријског приступа,
3. Систематизација претходних знања у области истраживања, као и синтеза нових резултата и знања која треба да допринесу даљем развоју и практичној примени изогеометријског приступа у динамичкој анализи конструкција.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

У оквиру докторске дисертације, кандидат је развио нумерички модел заснован на изогеометријском приступу за линеарну и геометријски нелинеарну динамичку анализу Бернули-Ојлерових криволинијских гредних елемената, чиме је показао ефикасност развијеног модела у односу на класичну МКЕ. Број степени слободе је смањен у односу на класичне приступе формулисања гредног елемента, што је такође допринело ефикасности поступка. У поређењу са МКЕ предности примењеног изогеометријског приступа огледају се у високој тачности и поузданости, начину дискретизације домена и смањеном времену потребном за прорачун. Коришћењем метода и рачунарског програма развијених у оквиру дисертације, крајњи корисник може да узме у обзир ефекте покретног динамичког оптерећења и прецизније одреди динамички одговор криволинијских

гредних елемената. Резултати приказани у оквиру дисертације су верификовани на примерима из литературе, као и коришћењем методе коначних елемената.

Применљивост резултата и развијеног програма у инжењерској пракси је велика, јер модел омогућава ефикаснију анализу криволинијских греда при дејству покретног динамичког оптерећења. Део резултата истраживања у оквиру дисертације публикован је врхунском међународном часопису са SCI листе.

Резултати приказани у дисертацији представљају одличну полазну основу за будуће истраживање, пре свега на формулацију нових елемената и њихову имплементацију у рачунарски програм, утицај трења између гредног елемента и покретне масе, као и анализу стабилности.

4.3. Верификација научних доприноса

У току истраживачког рада у ужој области теме докторске дисертације, кандидат Милош Јочковић објавио је следеће радове:

Категорија M21:

1. **Jočković M**, Radenković G, Nefovska-Danilović M, Baitsch M, (2019): Free vibration analysis of spatial Bernoulli-Euler and Rayleigh curved beams using isogeometric approach, Applied Mathematical Modelling 71, 152 – 172 (IF 3,633).

Категорија M33:

2. **Jočković M**, Nefovska-Danilović M, Free vibration analysis of beam element using isogeometric analysis, Contemporary achievements in Civil Engineering, 22.04.2016, Subotica, Serbia, 269 – 278. (ISBN 978-86-80297-63-7)
3. **Jočković M**, Baitsch M, Nefovska-Danilović M, Free vibration analysis of curved Bernoulli-Euler beam using isogeometric analysis, 5th International Congress of Serbian Society of Mechanics, 19.06.2017 – 21.06.2017, Tara, Serbia, S 1 – 10. (ISBN 978-86-909973-6-7)
4. **Jočković M**, Radenković G, Nefovska-Danilović M, Free vibration analysis of curved spatial Bernoulli-Euler beam with circular cross section using isogeometric approach. 7th International Congress of Serbian Society of Mechanics, 24.06.2019 – 26.06.2019, Sremski Karlovci, Serbia S4a 1 – 10. (ISBN 978-86-909973-7-4)
5. **Jočković M**, Nefovska-Danilović M, Isogeometric based dynamic analysis of Bernoulli Euler curved beam subjected to moving load, International Conference on Contemporary Theory and Practice in Construction XIV Stegrad (2020), 63 – 70. (ISSN 2566-4484)

Категорија M45:

6. **Jočković M**, Radenković G, Nefovska-Danilović M, (2019): Izogeometrijski pristup u analizi slobodnih vibracija prostornih Bernuli – Ojlerovih grednih nosača, Teorija građevinskih konstrukcija, Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, Univerzitet Crne Gore – Građevinski fakultet, Akademija inženjerskih nauka Srbije, 47 – 54.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу анализе приложене докторске дисертације, испуњености задатака и циљева истраживања, примењене методологије, научног доприноса и добијених резултата, може се констатовати да докторска дисертација под насловом „Изогеометријски приступ у динамичкој анализи просторних криволинијских гредних носача“ („Isogeometric approach in dynamic analysis of spatial curved beams”) представља оригинални научни допринос и потврду да је кандидат Милош Јочковић способан за самостални научно-истраживачки рад. Квалитет рада потврђен је чињеницом да су резултати дисертације објављени у врхунском међународном часопису са SCI листе, на основу чега се научни допринос Милоша Јочковића може сматрати значајним у области изогеометријске анализе гредних носача.

У оквиру дисертације формулисан је изогеометријски елемент Бернули-Ојлерове греде, на основу чега је развијен нумерички модел за динамичку анализу криволинијских гредних елемената при дејству покретног оптерећења и тиме начињен помак у примени изогеометријског приступа у динамичкој анализи просторних криволинијских греда. На основу теоретских разматрања, развијен је рачунарски програм, који је верификован бројним нумеричким примерима.

На основу напред изнетог, Комисија предлаже Наставно-научном већу Грађевинског факултета Универзитета у Београду да се прихвати позитивна оцена докторске дисертације Милоша Јочковића, маг.инж.грађ, под насловом „Изогеометријски приступ у динамичкој анализи просторних криволинијских гредних носача“ („Isogeometric approach in dynamic analysis of spatial curved beams”) и да се упути захтев Већу научних области грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду за давање сагласности за јавну одбрану дисертације.

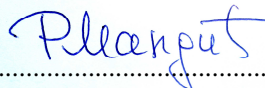
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



.....
В. проф. др Марија Нефовска-Даниловић,
Универзитет у Београду, Грађевински факултет



.....
Prof. Dr.-Ing. Matthias Baitsch,
Hochschule Bochum, Bochum University of Applied Sciences



.....
Проф. др Растислав Мандић (у пензији),
Универзитет у Београду, Грађевински факултет



.....
В. проф. др Александар Борковић,
Универзитет у Бањој Луци, Архитектонско-грађевинско-
геодетски факултет



.....
Доц. др Мирослав Марјановић,
Универзитет у Београду, Грађевински факултет