

ZAJEDNIČKI ZT EMELJI RIJEKA, 25.-27.09. 2019

Sedmi skup mladih istraživača iz područja građevinarstva
i srodnih tehničkih znanosti

Rijeka, 25. - 27. rujna 2019.

ZBORNİK RADOVA



Udruga hrvatskih građevinskih fakulteta

Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet



**Sedmi skup mladih istraživača iz područja
građevinarstva i srodnih tehničkih znanosti**

ZBORNIK RADOVA

IZDAVAČ

Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet
Radmile Matejčić 3
Rijeka

UREDNICI

Anton Bogdanić, mag. ing. aedif.
Ksenija Tijanić, mag. ing. aedif.
Laura Žiković, mag. ing. aedif.
Martina Šopić, mag. ing. aedif.
Sara Pajalić, mag. ing. aedif.

DIZAJN NASLOVNICE

Ksenija Tijanić, mag. ing. aedif.

ISBN 978-953-6953-51-6

Rijeka, 25. – 27. rujna 2019.

**ORGANIZACIJSKI ODBOR SKUPA
GRAĐEVINSKOG FAKULTETA U RIJECI**

Anton Bogdanić
Ksenija Tijanić
Laura Žiković
Martina Šopić
Sara Pajalić

Voditelj organizacijskog odbora
izv. prof. dr.sc. Vanja Travaš

Iako su poduzete sve mjere da se sačuva integritet i kvaliteta ove publikacije i u njoj sadržanih podataka, izdavač, urednik i autori ne smatraju se odgovornima za bilo koju štetu nanесenu imovini ili osobama zbog primjene ili korištenja ove knjige ili zbog korištenja u njoj sadržanih informacija, uputa ili ideja. Radovi objavljeni u knjizi izražavaju mišljenja autora koji su i odgovorni za objavljene sadržaje. Cjeloviti radovi smiju se reproducirati ili prenositi samo uz pismenu suglasnost izdavača. Manji dijelovi mogu se reproducirati samo uz odgovarajuće citiranje izvora.

Predgovor

Pod organizacijom Udruge hrvatskih građevinskih fakulteta, sada već tradicionalno jednogodišnje okupljanje mladih istraživača iz područja građevinarstva i drugih srodnih tehničkih znanosti ove će se godine održati na Građevinskom fakultetu u Rijeci. Primarni cilj ovakvog okupljanja mladih istraživača se očituje kroz priliku za ostvarivanjem novih kolegijalnih odnosa, ali i stvaranja novih poznanstva između doktorskih studenta i poslijedoktoranada s različitih građevinskih fakulteta za koja je opravdano očekivati da će izrasti u kolegijalne i suradničke odnosne, a nerijetko i u nova prijateljstva. Istovremeno, lako se složiti da prilika koju ovakav skup donosi u pogledu izlaganja vlastitog istraživačkog rada pred stručni auditorij drugih kolega posebno dragocjena jer generira iskustvo koje može oblikovati tijekom misli izlagača u narednim znanstveno-istraživačkim poduhvatima, ali i njihovim nadolazećim znanstvenim suradnjama. Skup istraživača s ovakvim odlikama nosi prikladni naziv Zajednički temelji.

Zajednički temelji su započeli u rujnu 2013. na Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije, te su se u narednim godinama održavali redom na: Građevinskom fakultetu u Rijeci (2014.), Građevinskom fakultetu u Mostaru (2015.), Građevinskom fakultetu u Osijeku (2016.), Građevinskom fakultetu u Zagrebu (2017.) te Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu (2018.).

Sve organizacijske aktivnosti ovogodišnjih Zajedničkih temelja su provedene zahvaljujući velikom trudu uloženom od strane djelatnika Građevinskog fakulteta u Rijeci: Sare Pajalić, Martine Šopić, Ksenije Tijanić, Laure Žiković i Antona Bogdanića. Njihov predan i strpljiv rad u proteklim mjesecima je ujedno rezultirao i ovim Zbornikom radova te se zahvaljuju svim autorima na dostavljenim radovima i recenzentima na pregledu istih.

Prodekan za znanstveno-istraživački rad i međunarodnu suradnju
izv. prof. dr.sc. Vanja Travaš

SADRŽAJ

Anton Vrdoljak, Kristina Miletić

Projektiranje i razvoj interaktivnih simulacija za studente
inženjerstva: slučaj carbonara..... 1

Laura Žiković, Gordan Jelenić

Analiza 2D mikropolarnog kontinuuma metodom konačnih elemenata7

Elizabeta Šamec, Milena Stavrić, Albert Wiltsche

FormFold paviljon – izrada makete slobodno oblikovanoga paviljona
koristeći parametarsko modeliranje i digitalnu proizvodnju..... 13

Maja Baniček, Krešimir Fresl, Damir Lazarević, Mario Uroš

Primjena grafičkog postupka određivanje ravnoteže prostornog
čvora na diskretne elemente 19

Anton Bogdanić, Joško Ožbolt

Crack band metoda - utjecaj oblika konačnih elemenata na numeričke rezultate.....25

Jelena Šantek Bajto, Nina Štirmer, Iva Ereš

Oštećenje mikrostrukture betona s pepelom drvne
biomase pri djelovanju smrzavanja i odmrzavanja31

Sara Pajalić, Željko Arbanas, Vedran Jagodnik

Fizički model za ispitivanje ponašanja konstrukcija za sanaciju klizišta37

Stanko Čolak, Ante Džolan

Modalna analiza višekratne konstrukcije43

Ante Buzov, Jure Radnić, Nikola Grgić

Utjecaj nekih parametara na ponašanje i graničnu nosivost višedijelnih
kamenih stupova pri statičkom opterećenju i potresu49

Marino Jurišić, Ante Džolan

Program postavljanja mjernih uređaja na mostu Grabovina 55

Nikola Perković, Vlatka Rajčić

Ocjena energetskih karakteristika kompozita CLT – staklo61

Marko Goreta, Neno Torić, Ivica Boko, Jelena Lovrić - Vranković

Preliminarna studija ponašanja aluminijskih stupova
nestacionarnim modelom zagrijavanja 65

Antonija Cikojević, Gordon Gilja Pregled postojećeg stanja znanja u istraživanju razvoja odbačene kaverne uz riprapp zaštitu.....	71
Tatjana Džeba, Marko Mimica, Maja Prskalo Održiva energija & uporaba u javnoj vodoopskrbi	77
Ivan Lovrinović, Veljko Srzić Određivanje parametara vodonosnika na području ušća rijeke Neretve primjenom "tidal methods"	82
Daniela Dumanić Primjena vlakana brnistre za ojačanje cementnog nosivog sloja kolničke konstrukcije .	87
Martina Zagvozda Primjena biopepela u nosivom sloju kolnika	93
Katarina Vranešić, Ivo Haladin, Stjepan Lakušić Podmazivanje tračnica - mjera smanjivanja visoke razine buke uslijed prolaska vozila kroz krivine malih polumjera	97
Jelena Kilić Modeliranje prostornog sustava za podršku odlučivanju u planiranju urbane komasacije	101
Martina Šopić, Mladen Vukomanović Video analiza praćenja kretanja i rada kamiona kiperu na gradilištu.....	107
Ivona Ivić, Anita Cerić Važnost komunikacije u projektima održavanja višestambenih zgrada u Hrvatskoj ...	114
Mihaela Teni, Hrvoje Krstić Analiza energetske svojstva zgrada - provođenje in situ mjerenja	120
Ksenija Tijanić, Diana Car-Pušić Procjena operativnih troškova škola primjenom umjetnih neuronskih mreža.....	126
Marin Brkić, Željko Rozić Klimatske promjene i obnovljivi izvori energije – pregled stanja u Bosni i Hercegovini	133
Nina Čeh Dinamička karakterizacija ljuhanja uređenih blokovskih sustava.....	139

DESIGNING AND THE DEVELOPMENT OF AN INTERACTIVE SIMULATIONS FOR ENGINEERING STUDENTS: THE CASE OF CARBONARA

PROJEKTIRANJE I RAZVOJ INTERAKTIVNIH SIMULACIJA ZA STUDENTE INŽENJERSTVA: SLUČAJ CARBONARA

Anton Vrdoljak¹, Kristina Miletić¹

(1) University of Mostar, Faculty of Civil Engineering, Bosnia and Herzegovina, {anton.vrdoljak, kristina.miletic}@gf.sum.ba

Abstract

Computer-based learning has been widely used in engineering education and a large number of research, studies and reports, regarding its usage and effectiveness have been accessed broadly. The software solution, known as CARBONARA (Computer Aided Research Boosts Optimization, Numerical and Regression Analysis), which covers a few branches of mathematics that are essential for engineering education, has been proposed for development. There will be three modules, each containing several submodules, within CARBONARA software, and all will be implemented in the object-oriented programming language C#, within Microsoft Visual Studio 2015 software package. This article aims to present one of the developed submodules in the current solution, Curve Fitting, but also to propose a new approach by which lecturers might incorporate computer-aided research into their statistics and/or applied mathematics courses, and transform the learning experiences of their students.

Keywords: computer-aided research, computer-based learning, engineering education, curve fitting

Sažetak

Učenje zasnovano na računalima naširoko se koristi u inženjerskom obrazovanju i veliki je broj istraživanja, studija i izvješća o njegovoj upotrebi i djelotvornosti široko dostupan. Za razvoj je predloženo softversko rješenje, poznato kao CARBONARA (Computer Aided Research Boosts Optimization, Numerical and Regression Analysis), koje obuhvaća nekoliko grana matematike, neophodnih za inženjersko obrazovanje. Planirana su tri modula, od kojih će svaki sadržavati nekoliko podmodula, unutar CARBONARA programa, a sve će biti implementirano u objektno orijentiranom programskom jeziku C#, unutar programskog paketa Microsoft Visual Studio 2015. Cilj ovog rada je prikazati jedan od razvijenih podmodula u postojećem rješenju, Curve Fitting, ali i predložiti novi pristup koji bi predavači mogli uključiti istraživanje potpomognuto računalima u svoju nastavu statistike i/ili primijenjene matematike, te transformirati iskustva učenja kod svojih studenata.

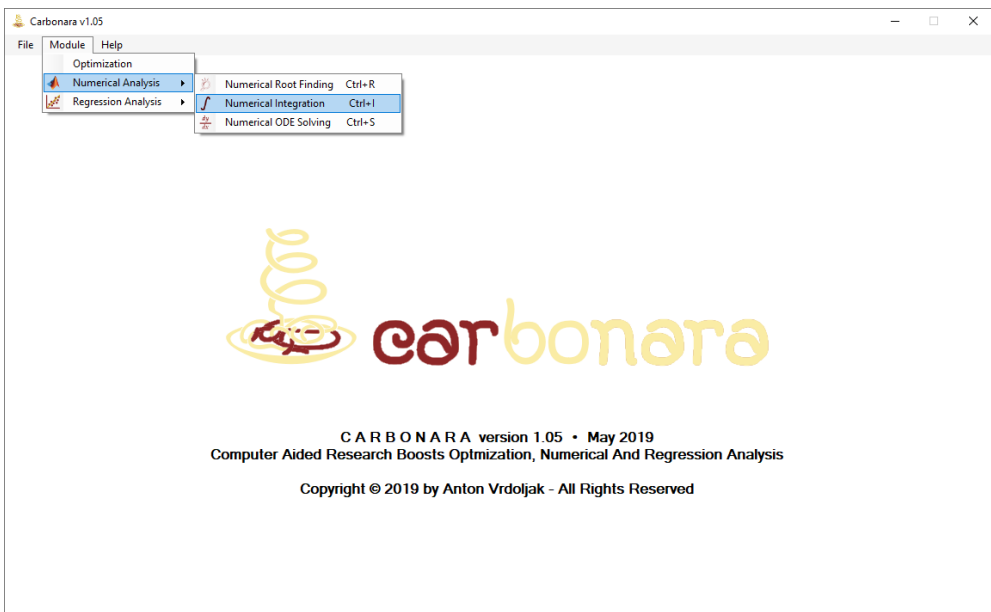
Ključne riječi: istraživanje potpomognuto računalima, učenje zasnovano na računalima, inženjersko obrazovanje, prilagodba krivuljama

1. Introduction

As math teachers at higher education institution, who strive to follow modern trends of the teaching of mathematics, we have been architected a new computer-based learning environment (CBLE). Development of the solution is planned to be completed around the end of 2020. Carbonara is a computer-aided engineering software which would make it easier for users to analyse, explore, visualise and simulate various problems regarding these branches of mathematics: applied mathematics and statistics – with an accent on optimization, numerical and regression analysis [1]. As users of this software, we mainly consider undergraduate and/or graduate students of engineering faculties, at technical or applied universities, as well as their teachers or lecturers. The software solution interface of Carbonara is shown in Figure 1. Until the end of 2020 we plan to develop these three modules:

- optimisation,
- numerical analysis
- and regression analysis

and each of them will contain several submodules. In other words, Carbonara's modules will allow users to find, analyse and visualise global and local extrema of functions, to explore and visualise stationary points of functions, to compute and analyse roots of equations, to solve numerical integrals, to compute solutions to ordinary differential equations using numerical methods, and to fit and simulate different parameterized models to data. So far, just one submodule, Curve Fitting, is completed. Hence, in the current version (Carbonara v1.05), the users are only able to fit linear, polynomial ($2 \leq n \leq 4$), exponential, logarithmic and power models to data and compute the quality of the fit. Also, it is possible to export the complete Curve Fitting report as a .pdf file to the local disk. The current solution can be run on computers that operate in Microsoft Windows operating system. Although the Carbonara software solution is still under development, and it has yet to be formally implemented and tested, we believe that it may ensure to students interactive explanations which helps them to achieve some main learning goals during teaching applied mathematics and statistics. Of course, we are aware that such is not an easy task.

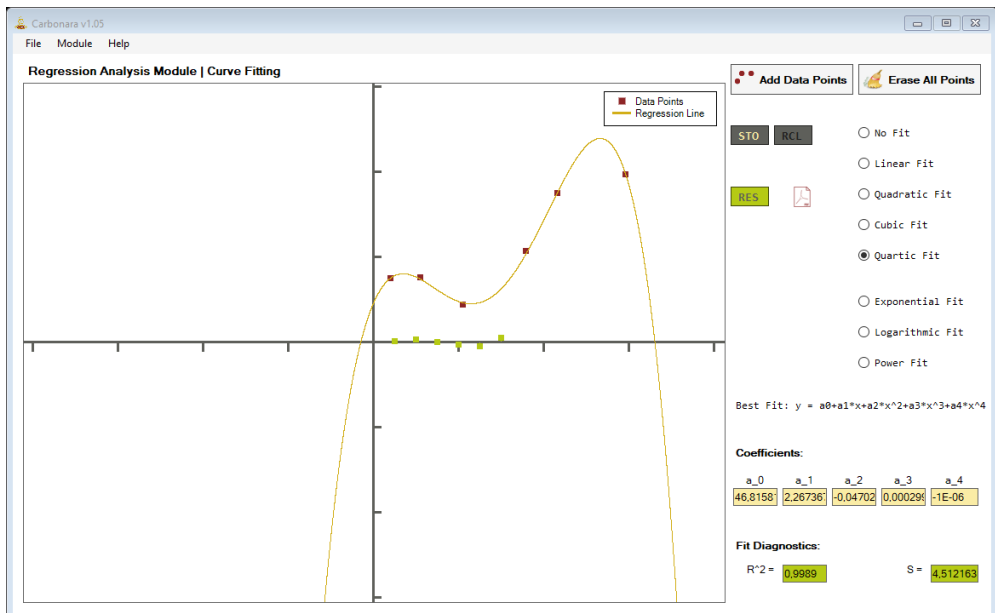


Slika 1. Software solution interface of Carbonara [1]

Dynamic and interactive visualisations and also interactive simulations have the potential to improve computer-based learning in various ways – especially if they are presented in combination with other kinds of external representations – their mental processing can also be very demanding and so easily overburden the cognitive capacities of learners. To enable learners to take advantage of the potential of dynamic and interactive visualisation, as well as interactive simulations, in computer-based learning environments, they need support in coping with specific requirements of these visualisations and in relating them systematically to other external representations [2]. Many researchers are successful with designing and developing dynamic and interactive simulations. For example, a small team of researchers at the University of Colorado has created free interactive math and science simulations, known as PhET Interactive Simulations [3], [4], [6]. PhET Interactive Simulations are based on extensive education research and engage students through an intuitive, game-like environment where students learn through exploration and discovery. Such general motto, “Interact, Discover, Learn!”, has been adopted by some other researchers and has been implemented in their interactive tools [5]–[9]. As users interact with their tools, they get immediate feedback about the effect of changes they made. This allows them to investigate cause-and-effect relationships and answer scientific questions through an exploration of the simulation [3]. Each of Carbonara’s submodules will strive to satisfy this important motto, as well as the demand for generally acceptable design criteria.

2. Curve fitting submodule

Concepts of optimisation, numerical and regression analysis have been introduced to engineering students already at the undergraduate level, within courses of calculus and statistics [10], [11], [12], and also later at the graduate level, within applied mathematics courses [13]. Undoubtedly, curve fitting is one of the most present topics among those concepts. The first exposure of students to curve fitting may have been to determine intermediate values from tabulated data. Data are often given for discrete values along a continuum. However, users may require estimates at points between the discrete values. Although many widely used engineering properties have been tabulated, there are great many more that are not available in this convenient form [13].



Slika 2. Regression analysis module – Curve fitting submodule

Special cases and new problem contexts often require that users measure their own data and develop their own predictive relationships. Two types of applications are generally encountered when fitting experimental data: trend analysis and hypothesis testing. In addition to the above engineering applications, curve fitting is important in other numerical methods such as integration and the approximate solution of differential equations. This also was the main reason why it has been decided to start designing and the development of interactive simulations for engineering students with curve fitting. Curve fitting submodule, the integral part of Carbonara's regression analysis module, is shown in Figure 2 and will be introduced in more details below.

To make the best use of Curve Fitting submodule, it is helpful to know some of the theory behind regression analysis. Regression analysis is a technique used to calculate the "best fit" line or curve through a data set by minimizing the deviation of the data from the curve, and it is probably the most powerful method to analyse data [5], [13]–[17]. It allows you to isolate and understand the effects of individual variables, model curvature and interactions, and make predictions. Regression analysis offers high flexibility but presents a variety of potential pitfalls [16]. Mathematically, it finds values for various unknown parameters in an equation that produce the smallest possible sum of the squares deviations of the experimental values from the calculated ones, i.e. it is the mathematical equivalent of finding the best line or curve by eye [5]. It is also possible to fit the "best curve" through the data by non-linear regression. This has no manual equivalent (because humans are very poor at judging accurate curvature), but is equally simple mathematically using computational methods. As mentioned in the introduction, under Curve Fitting submodule the users are able to fit linear, polynomial ($2 \leq n \leq 4$), exponential, logarithmic and power models to data and compute the quality of the fit. It is implemented in the object-oriented programming language C#, within Microsoft Visual Studio 2015 software package, in the English language. What we mean by fitting linear, polynomial, exponential, logarithmic and power models to data in this context? Fitting these models to data, or data fitting, is the mathematical analysis of a data set. Specifically, we used it to fit the "best line" or "best curve" through our data and give us fitted parameter values [5], [13]–[17]. Thanks to modern computer technology we are able to do computer-based data fitting in some specialized programs, which obviously has several advantages, for example, it is faster than manual methods and gives values that are not subjective. Next, the data can be fitted to complex equations including non-linear ones, and the fit also gives the error estimates that can be used to assess data quality. However, most of the specialized computer-based data fitting environments will not help students or other researchers to understand how well given curve describes a set of data. Simply said, we would assert that the using of technology have to be done more wisely. Therefore, our core idea was to design and develop dynamic and interactive simulations, but also an effective teaching tool, i.e. to develop a software solution by which students' engineering skills may be boosted while doing various statistical and mathematical tasks. In order to achieve such goal, the authors decided that the Carbonara software should meet a number of generally acceptable design criteria, and some of the most important aspect of teaching and learning based on digital technology [8], [18], but also to implement the general motto, "Interact, Discover, Learn!" [3], [4], [6].

The main window of Curve fitting submodule has been split into two dynamic parts. The larger part, the dynamic plane on the left, serves for showing the data points, a regression line and the plot of the residuals. The smaller part serves for adding data points (in the current version users can add only a limited number of data points) or deleting all of them, selecting of the best fit or no fit, hiding or showing the plot of the residuals, showing the values for the coefficients of the best fit and showing fit diagnostics, i.e. the values of the correlation coefficient R^2 (R-squared) and the standard error of the regression S . Next, there are buttons **STO** & **RCL**, for storing the data points into temporary memory (any collection of data points already in memory will be overwritten), and for retrieving the data points in memory and displaying them at dynamic plane. Finally, there is a button for exporting the complete Curve Fitting report as a .pdf file to the local disk. With their mouse, users are able to drag data points over a dynamic plane and watch the best-fit curve update instantly. At the same time, the values of coefficients for linear, polynomial,

exponential, logarithmic and power regression, but also the values for the correlation coefficient and the standard error of regression, are given as feedback or information. Next, by adding even more new data points, it's possible to dynamically change the shape of the best curve and coefficient values too, which are represented numerically and graphically. In addition to the above dynamic and interactive visualisation, it is possible to have the plots of the residuals displayed at the dynamic plane as well. All this together is the most important function of this interactive simulation, because immediate knowledge of the values of coefficients for linear, polynomial, exponential, logarithmic and power regression, as well as the values for the correlation coefficient and the standard error of regression, after adding new data points, with or without the plots of the residuals at dynamic plane, has the potential to change the student's activities in a very impressive manner. Probably the most important aspect of the computer-based learning environments is not access to information, but the ability to customize learning approaches to match student's learning styles. So, in designing and development of Curve Fitting submodule, our focus was on the development of such model which will support above indicated aspect, but also will consider these objectives for students and teachers respectively [3], [5]:

- Students will formulate and ask questions; make predictions; identify cause-effect relationships; make meaning of visual and mental models; make connections to everyday life; direct their own learning through exploration; develop further interest in science.
- Teachers will create a student-centered classroom; foster a supportive, goal-oriented learning environment; bring their experience professionalism and knowledge of their students to designing and the development of interactive simulations.

Besides main learning goals, we expect here too that the user of this submodule finds, by exploring and observing numerical data and graphic representation, some optional but advanced learning goals: differentiate between the correlation coefficient and the standard error of the regression; how high does R-squared need to be; use the equation for the standard error of the regression to explain why a curve fit with a value near zero describes the data well; use the plots of the residuals to explain why if there are patterns in the residuals there is a need to adjust the model.

3. Conclusion

Researchers have been debating the effectiveness of computer-based learning, i.e. the effectiveness of computers as educational tools almost since their introduction. There seems to be wide agreement on the positively impact on student performance when computer technology is used in STEM education (the constructivist approach to learning). Yet, there are still many issues regarding fitting education technology wisely into practice and especially into engineering practice, which require careful academic attention. Fortunately, there is a growing body of literature suggesting that what teachers do with computer technology in general, and with dynamic and interactive visualisations and interactive simulations specifically, is key to promoting learning gains. In this work, we aimed to present in general a new computer-based learning environment, i.e. the new software solution Carbonara, and one of its submodules (Curve Fitting) in particular. We believe that incorporating instructional design principles in the design of learning materials and developing further educational software for engineering students in ways that can be shared between researchers could be an effective way to influence its further improvement. Thus, Carbonara is free to download, use and share, and a lead architect will strive to listen to all users who will be able to reveal the areas that require some improvement.

References

- [1] Carbonara (Computer Aided Research Boosts Optimization, Numerical And Regression Analysis), link: <https://github.com/Vrda-GF/Carbonara>, accessed on Monday, June 3, 2019
- [2] Bodemer, D., Ploetzner, R., Feuerlein, I., Spada, H.: The active integration of information during learning with dynamic and interactive visualization, Learning and Instruction, vol. 14, 2004, pp. (325 – 341), DOI: 10.1016/j.learninstruc.2004.06.006
- [3] Loeblein, T., Dubson, D.: Curve Fitting: How well does the curve describe the data? (Inquiry Based) – PhET Contribution, 2008, University of Colorado, link: <https://phet.colorado.edu/>, accessed on Sunday, June 16, 2019
- [4] Adams W. K.: Student engagement and learning with PhET interactive simulations, Il Nuovo Cimento C: Multimedia in Physics Teaching and Learning - MPTL14, vol. 33 (3), 2010, pp. (21-32), DOI: 10.1393/ncc/i2010-10623-0
- [5] Vrdoljak, A.: Advanced Visualization for Polynomial Regression Data Fit, Proceedings of the 1st International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering, Tirana, Albania, EPOKA University, 2011
- [6] Whitacre, I., Hensberry, K., Schellinger, J., Findley, K.: Variations on play with interactive computer simulations: balancing competing priorities, International Journal of Mathematical Education in Science and Technology, 2018, DOI: 10.1080/0020739X.2018.1532536
- [7] Sokolowski, J. A., Banks, C. M.: Modeling and simulation fundamentals, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, USA, 2010
- [8] Vrdoljak, A.: Implementation models of ICT–tools in teaching mathematics (Implementacioni modeli ICT–alata u nastavi matematike), master thesis, University of East Sarajevo, B&H, 2009
- [9] Wenglinisky, H.: Using technology wisely, Teachers College Press, N. York, USA, 2005
- [10] Anton, H., Bivens, I., Davis, S.: Calculus, 10th Edition, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, USA, 2012
- [11] Červar, B., Miletić, K.: Matematika 1 - Radna skripta, Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru, Mostar, BiH, 2015
- [12] Červar, B., Miletić, K.: Matematika 2 - Radna skripta, Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru, Mostar, BiH, 2015
- [13] Chapra, S. C., Canale, R. P.: Numerical methods for engineers, 7th Edition, McGraw-Hill Education, New York, USA, 2015
- [14] MathWorks, I.: Curve Fitting Toolbox User's Guide, Release 2016a, The MathWorks, Inc., Massachusetts, USA, 2016
- [15] Leatherbarrow, R. J.: GraFit Version 7, Erithacus Software Ltd., Horley, U. K., 2010
- [16] Frost, J.: Regression Analysis, 1st Edition, 2019
- [17] Draper, N. R., Smith, H.: Applied Regression Analysis, 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 1998
- [18] Hénard, F., Reoseveare, D.: Fostering quality teaching in higher education: policies and practices, An Institutional Management in Higher Education (IMHE) guide for higher education institutions, OECD, September 2012.

ANALIZA 2D MIKROPOLARNOG KONTINUUMA METODOM KONAČNIH ELEMENATA

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF 2D MICROPOLAR CONTINUUM

Laura Žiković¹, Gordan Jelenić¹

(1) Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, laura.zikovic@uniri.hr, gordan.jelenic@uniri.hr

Sažetak

Klasična (Cauchyjeva) teorija kontinuuma ne razmatra utjecaj mikrostrukture koja ima značajnu ulogu pri opisivanju pojedinih materijala, posebice heterogenih. Kako bi se opisali efekti koji nisu obuhvaćeni u klasičnoj teoriji razvile su se razne teorije među kojima je i mikropolarna (Cosseratova). U radu je izveden analitički model linearnog mikropolarnog kontinuuma gdje su obuhvaćene ravnotežne, kinematičke i konstitutivne jednačbe. U analizi ravninskog stanja čistog savijanja konzole korišteni su trokutni konačni elementi (T3) sa Lagrangeovom interpolacijom te je za validaciju elementa provedena usporedba s analitičkim rješenjem. Ključ šire uporabe mikropolarne teorije leži u poznavanju mikropolarnih materijalnih parametara no metodologija za njihovo jednoznačno određivanje još nije uspostavljena. U sklopu rada na projektu Hrvatske zaklade za znanost FIMCOS provesti će se daljnja numerička analiza i eksperimentalna mjerenja u svrhu identificiranja materijalnih parametara.

Ključne riječi: mikropolarna teorija, mikrorotacija, metoda konačnih elemenata

Abstract

Classical (Cauchy) continuum theory does not consider the influence of microstructure, which plays a significant role in describing certain materials, especially heterogeneous ones. In order to describe effects not covered by the classical theory, various alternative theories have been developed, including the micropolar theory (Cosserat). Analytical model of the linear micropolar continuum is derived in this paper, where equilibrium, kinematic and constitutive equations are covered. In the plane state analysis of pure bending of a cantilever, triangular finite elements (T3) with Lagrangian interpolation are used and a comparison with the analytical solution is performed. The key to wider use of the micropolar theory lies in knowing the micropolar material parameters, but the methodology for their unambiguous determination has not yet been established. As part of the work on the Croatian science foundation's project FIMCOS, further numerical analysis and experimental measurements will be conducted with the purpose of identifying the material parameters.

Keywords: micropolar theory, microrotation, finite element method

1. Uvod

Teorija kontinuuma pretpostavlja da je cjelokupni volumen promatranog tijela u potpunosti ispunjen materijom bez ikakvih šupljina. Takav opis kod homogenog kontinuuma daje klasičnu teoriju kontinuuma i rezultate koji se poprilično dobro podudaraju s rezultatima dobivenih eksperimentalno na uzorcima poput čelika i aluminija [1]. Međutim, fizička je činjenica da kontinuum nije homogen i da posjeduje određenu mikrostrukturu koja ima utjecaj na makroskopsko ponašanje. U određenim slučajevima, ukoliko se mikrostruktura zanemari, analitička rješenja prema klasičnoj teoriji nisu zadovoljavajuća. Klasična teorija ne može opisati takozvani size-effect koji je uočen kod tanjih uzoraka podvrgnutih torziji ili savijanju koji se ponašaju kruće u odnosu na deblje uzorke od materijala sa značajnom mikrostrukturom. Također, na mjestima diskontinuiteta kao npr. ploče s kružnom rupom (Kirschov problem) klasična teorija predviđa konstantni faktor koncentracije naprezanja ($k = 3$) neovisno o materijalnim parametrima i veličini rupe, dok je eksperimentalno uočeno da je ta vrijednost manja i ovisna o veličini rupe [2]. Iz navedenih razloga je za opisivanje materijala poput polimera, metalnih pjena, tekućih kristala i sl. potreban model koji zahvaća strukturne efekte te su se razvile različite alternativne teorije među kojima je i mikropolarna (Cosseratova) teorija kontinuuma [1]. Razmatranjem utjecaja mikrostrukture materijala dolazi do povećanja broja stupnjeva slobode, a svakoj točki tijela uz komponente pomaka, pridodaje se i nedeformabilni vektor orijentacije (mikrorotacija) neovisan o pomacima promatrane točke (makrorotacije). Također, međusobno djelovanje između susjednih čestica tijela je uz vektor naprezanja, dodatno opisano i vektorom sprega [3].

2. Analitički model linearnog mikropolarnog kontinuuma

Analizira se tijelo B sastavljeno od materijalnih čestica X, Y , itd. u deformiranoj konfiguraciji koje zauzima volumen V unutar oplošja S . Na tijelo djeluju kontinuirana volumna (\mathbf{p}_v i \mathbf{m}_v) i površinska (\mathbf{p}_s i \mathbf{m}_s) opterećenja. U točki X definiranoj vektorom položaja \mathbf{x} u trenutku t , postoji Cauchjev tenzor naprezanja $\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}, t)$ i dodatni tenzor momentnih naprezanja $\boldsymbol{\mu}(\mathbf{x}, t)$.

2.1. Jednadžbe ravnoteže

Promatra se sada diferencijalni volumen dV opisanog tijela B . Ukoliko se sumiraju komponente nanesenog opterećenja i unutarnjih sila u sva tri smjera koordinatnih osi dobiva se prva jednadžba ravnoteže

$$\operatorname{div} \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{p}_v = 0 \quad (1)$$

dok sumiranjem svih momenata oko koordinatnih osi proizlazi i druga jednadžba ravnoteže

$$\operatorname{div} \boldsymbol{\mu} + \mathbf{a} + \mathbf{m}_v = 0 \quad (2)$$

gdje je \mathbf{a} aksijalni vektor dvostrukog anti-simetričnog dijela tenzora naprezanja. U mikropolarnoj teoriji kao rezultat djelovanja volumnog momenta \mathbf{m}_v i divergencije tenzora momentnih naprezanja $\operatorname{div} \boldsymbol{\mu}$ nastaje nesimetričan tenzor naprezanja $\boldsymbol{\sigma}$. Na dijelu oplošja S_p s definiranim površinskim silama \mathbf{p}_s i površinskim momentima \mathbf{m}_s dodatno vrijede rubni uvjeti ravnoteže:

$$\boldsymbol{\sigma} \mathbf{n} = \mathbf{p}_s, \quad \boldsymbol{\mu} \mathbf{n} = \mathbf{m}_s \quad (3)$$

Na preostaloj dijelu oplošja definirani su kinematički rubni uvjeti.

2.2. Kinematičke jednadžbe

Osim polja pomaka $\mathbf{u}(\mathbf{x})$, u mikropolarnoj teoriji postoji dodatno kinematičko polje - mikrorotacija $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x})$ koje svakoj točki pripisuje orijentaciju i potpuno je neovisno o polju pomaka i makrorotaciji

koja iz njega proizlazi. U linearnom mikropolarnom kontinuumu normalne deformacije ε_{ii} za $i = 1, 2, 3$ definirane su kao promjena duljine materijalnog vlakna u odnosu na početnu duljinu kada ona teži nuli. Analiziranjem tijela na diferencijalnoj razini i primjenom Taylorovog razvoja funkcija dobivaju se normalne deformacije $\varepsilon_{ii} = \frac{\partial u_i}{\partial x_i}$ koje su jednake onima u klasičnoj teoriji, čime je dokazano da mikrorotacija ne doprinosi niti produljenju niti skraćenju materijalnih vlakana. Međutim, utjecaj mikrorotacije utječe na formiranje posmičnih deformacija ε_{ij} za $i \neq j$. Za razliku od klasične teorije gdje su posmične deformacije jednake sumi posmičnih kutova, u mikropolarnoj teoriji posmična deformacija jednaka je razlici promjene nagiba materijalnog vlakna tijekom deformiranja α i mikrorotacije $\varphi(x)$. U konačnici, komponente mikropolarnog tenzora deformacije jednake su [4]

$$\varepsilon_{ij} = u_{i,j} + \varepsilon_{ijk} \varphi_k \quad (4)$$

gdje je ε_{ijk} permutacijski simbol. Kao posljedica djelovanja dodatnih momentnih napreznja postoji i kutna deformacija – tenzor zakrivljenost κ čije se komponente definiraju kao granična vrijednost promjene rotacije po koordinati kada promjena koordinate teži nuli, to jest

$$\kappa_{ij} = \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_j} \quad (5)$$

gdje prvi indeks zakrivljenosti označava os oko koje se odvija rotacija, a drugi indeks smjer promjene rotacije. Tenzor zakrivljenosti κ za 3D problem jednak je dakle

$$\kappa = \text{grad } \varphi \quad (6)$$

Članovi κ_{ii} predstavljaju torzijske deformacije, koje se pojavljuju samo u 3D problemu.

2.3. Konstitutivne jednadžbe

U mikropolarnoj teoriji kontinuuma postoje dva nezavisna tenzora napreznja σ i μ povezana sa dva tenzora deformacije ε i κ . Veza između komponenata navedenih tenzora napreznja i deformacija opisana je pomoću konstitutivnih tenzora četvrtog reda \mathbf{T} i \mathbf{D} . Za razliku od klasične teorije, tenzori napreznja i deformacija su nesimetrični te za linearno elastični izotropni materijal sada oba konstitutivna tenzora imaju po tri nezavisna materijalna parametra te se dobivaju dvije nezavisne konstitutivne jednadžbe [4]:

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{pp} \delta_{ij} + (\mu + \nu) \varepsilon_{ij} + (\mu - \nu) \varepsilon_{ji} \quad (7)$$

$$\mu_{ij} = \alpha \kappa_{pp} \delta_{ij} + (\beta + \gamma) \kappa_{ij} + (\beta - \gamma) \kappa_{ji} \quad (8)$$

gdje je δ_{ij} Kroneckerov delta simbol, dok su $\alpha, \beta, \gamma, \lambda, \mu$ i ν materijalni parametri elastičnog izotropnog mikropolarnog kontinuuma. Parametri λ i μ predstavljaju Laméove konstante, dok su α, β, γ i ν dodatni parametri linearnog izotropnog kontinuuma. Kao posljedica pozitivne definitnosti konstitutivnih tenzora vrijede slijedeća ograničenja materijalnih parametra: $3\lambda + 2\mu > 0, \mu > 0, \nu > 0, 3\alpha + 2\beta > 0, \beta > 0$ i $\gamma > 0$ [1]. Navedeni materijalni parametri povezani su s inženjerskim parametrima [5]:

$$\lambda = \frac{2nG}{1-2n}, \quad \mu = G, \quad \nu = \frac{GN^2}{1-N^2} \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{2Glt^2(1-\psi)}{\psi}, \quad \beta = Gl^2, \quad \gamma = G(4lb^2 - l^2) \quad (10)$$

gdje je G modul posmika, n Poissonov koeficijent, l_i i l_b karakteristične duljine za torziju i savijanje. N predstavlja mjeru povezanosti između makrorotacije i mikrorotacije u granicama $\langle 0, 1 \rangle$, te ψ predstavlja polarni omjer koji je unutar granica $\langle 0, \frac{3}{2} \rangle$.

3. Primjena na metodu konačnih elemenata

Da bi sustav bio u ravnoteži mora vrijediti princip virtualnog rada koji nalaže da virtualni rad unutarnjih sila mora biti jednak virtualnom radu vanjskih sila:

$$V_i(\mathbf{u}, \boldsymbol{\varphi}; \bar{\mathbf{u}}, \bar{\boldsymbol{\varphi}}) = V_e(\bar{\mathbf{u}}, \bar{\boldsymbol{\varphi}}) \quad (11)$$

$$\int_V (\bar{\boldsymbol{\varepsilon}} : \boldsymbol{\sigma} + \bar{\boldsymbol{\kappa}} : \boldsymbol{\mu}) dV = \int_V (\bar{\mathbf{u}}^T \mathbf{p}_v + \bar{\boldsymbol{\varphi}}^T \mathbf{m}_v) dV + \int_{S_p} (\bar{\mathbf{u}}^T \mathbf{p}_s + \bar{\boldsymbol{\varphi}}^T \mathbf{m}_s) dS \quad (12)$$

gdje su \mathbf{u} i $\boldsymbol{\varphi}$ vektori pomaka i mikrorotacije te $\bar{\mathbf{u}}$ i $\bar{\boldsymbol{\varphi}}$ virtualni vektori pomaka i mikrorotacije, a $\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}$ i $\bar{\boldsymbol{\kappa}}$ tenzori virtualne mikropolarne deformacije i zakrivljenosti. Kinematička polja mogu se interpolirati i matricno zapisati kao

$$\mathbf{u} = \mathbf{N}_u \boldsymbol{\rho}, \quad \boldsymbol{\varphi} = \mathbf{N}_\varphi \boldsymbol{\rho} \quad (13)$$

gdje su \mathbf{N}_u i \mathbf{N}_φ matrice interpolacijskih funkcija koje ovise o odabranoj interpolaciji, dok je $\boldsymbol{\rho}$ vektor lokanih stupnjeva slobode. Uvrštavanjem u kinematičke jednadžbe (4) i (5) u konačnici dobivamo

$$\bar{\mathbf{r}}^T (\mathbf{K} \mathbf{r} - \mathbf{R}) = 0 \quad (14)$$

odnosno

$$\mathbf{K} \mathbf{r} = \mathbf{R} \quad (15)$$

gdje \mathbf{r} predstavlja globalni vektor nepoznatih čvornih pomaka i rotacija, \mathbf{K} globalnu matricu krutosti i \mathbf{R} globalni vektor vanjskog opterećenja, dok je $\bar{\mathbf{r}}$ globalni vektor virtualnih čvornih pomaka i rotacija.

4. Numerički primjer

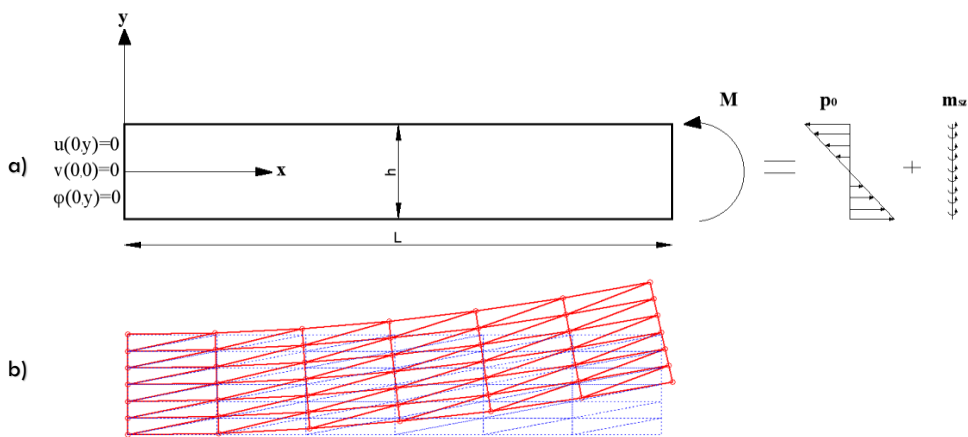
Razmatra se ravninska konzola duljine $L = 10$ m, debljine $b = 1$ m i visine $h = 2$ m opterećena na slobodnom kraju koncentriranim momentom $M = 20$ Nm [Slika 1.a)]. U klasičnoj teoriji za stanje čistog savijanja koncentrirani moment se može distribuirati uz pomoć linearnog promjenjivog površinskog opterećenja $p_{sx}(y) = \frac{2y}{h} p_0$. Prema Gauthieru & Jahsmannu [5] pokazano je da je za stanje čistog savijanja mikropolarnog kontinuuma moment M potrebno distribuirati uz pomoć površinskog linearnog promjenjivog opterećenja p_{sx} i dodatno kontinuiranim površinskim momentom m_{sz} , tj.

$$M = b \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (y p_{sx} + m_{sz}) dy \quad (16)$$

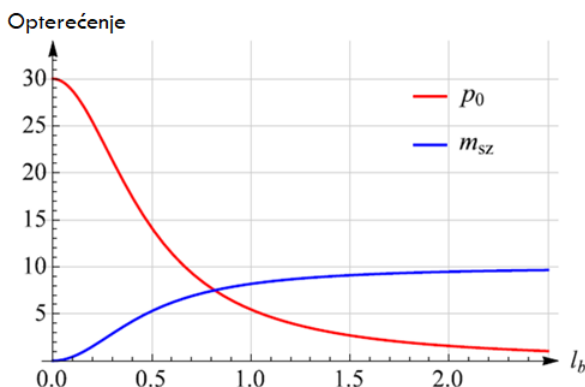
Stanje čistog savijanja postignuto je samo za točno određeni omjer m_{sz} i $p_0 = p_{sx}(-\frac{h}{2})$ koji ovisi o materijalnim parametrima [4] i iznosi

$$\frac{m_{sz}}{p_0} = \frac{1}{h} \frac{(\lambda + 2\mu)(\beta + \gamma)}{2\mu(\lambda + \mu)} \equiv \frac{h}{6} (1 - n) \delta \quad (17)$$

gdje je $\delta = 24(l_b/h)^2$. Ukoliko karakteristična duljina za savijanje l_b teži nuli manji je utjecaj mikrostrukture te se konačno rješenje za polje pomaka približava rješenju prema klasičnoj teoriji [Slika 2.], u kojoj m_{sz} uopće ne postoji.



Slika 1. a) čisto savijanje konzole; b) mreža elemenata u nedeformiranom i deformiranom stanju



Slika 2. Ovisnost površinskog opterećenja o karakterističnoj duljini za savijanje [4]

Za navedeni problem u programu Mathcad provedena je numerička analiza metodom konačnih elemenata [Slika 1.b)] gdje su korišteni trokutni elementi s Lagrangeovom interpolacijom prema izrazu (13) a rješenja su dobivena prema izrazu (15).

Odabrani inženjerski materijalni parametri su $E = 1500 \text{ N/m}^2$ i $n = 0.25$ koji daju Laméove konstante $\mu = 600 \text{ N/m}^2$ i $\lambda = 600 \text{ N/m}^2$. Materijalni parametar $\nu = 200 \text{ N/m}^2$ ovisi o vrijednosti N , koji je u ovome primjeru proizvoljno izabran u iznosu od 0.5. Karakteristična duljina l_b je u granicama $[0.1, 1.8]$ kako bi se obuhvatio size-effect. Dobivene vrijednosti pomaka konzole na donjem slobodnom rubu uspoređene su s analitičkim vrijednostima za $l_b = 0, 1$ i $1,8$. Progušćivanjem mreže numeričko rješenje konvergira ka analitičkom [Tablica 1.] a uočena je brža konvergencija za veću vrijednost l_b . Brža konvergencija može se ostvariti i povećanjem stupnja interpolacijskog polinoma i upotrebom vezane interpolacije kao što je prikazano u [6].

Tablica 1. Odstupanje numeričkog rješenja od analitičkog [%] – pomak točke na rubu konzole.

Br. elemenata	Odstupanje od analitičkog rješenja [%]	
	$l_b=0,1$	$l_b=1,8$
4	97.39	68.68
8	89.20	62.90
...
2 000	0.91	0.64

5. Zaključak i budući rad

Mikropolarnom teorijom moguće je opisati fenomene koje klasična teorija ne predviđa, no za njenu širu upotrebu potrebno je poznavati vrijednosti mikropolarnih materijalnih parametara za čije jednoznačno određivanje nije još utvrđena metodologija. U radu je izveden analitički model linearnog izotropnog mikropolarnog kontinuuma te je primijenjen na metodu konačnih elemenata. Prikazani izvodi, numerički model, kao i zaključci, tvore pogodnu teorijsku podlogu za daljnju numeričku analizu. U sklopu rada na projektu Hrvatske zaklade za znanost FIMCOS razvija se nova familija konačnih elemenata za linearnu statičku i dinamičku analizu mikropolarnog kontinuuma koja se temelji na konceptu nepomičnog pola. Tako razvijeni elementi dodatno stvaraju neophodni preduvjet za efikasnu proceduru potrebnu za identificiranje materijalnih parametara iz eksperimentalnih mjerenja. U tu svrhu provesti će se ispitivanja na 3D printanim uzorcima sa izraženom mikrostrukturom na testovima čistog savijanja pravokutne ploče (Gauthierov problem) i jednoosnog rastezanja ploče s kružnom rupom (Kirschov problem), oba popraćena kontaktnim i bezkontaktnim mjerenjima.

Zahvale

Rezultati prikazani u ovom radu dobiveni su u sklopu rada na projektu IP 1732 Hrvatske zaklade za znanost FIMCOS (Koncept nepomičnog pola u numeričkom modeliranju Cosseratovog kontinuuma). Istraživanje je dodatno podržalo Sveučilište u Rijeci putem potpore br. 1413 (Računski i eksperimentalni postupci za određivanje materijalnih parametara Cosseratovog kontinuuma).

Literatura

- [1] Nowacki, W.: Theory of micropolar elasticity, Springer-Verlag, Vienna, 1972.
- [2] Toubal, L., Karama, M., Lorrain, B.: Stress concentration in a circular hole in composite plate. Compos. Struct. 68, 31–36 (2005).
- [3] Eremeyev, V. A., Lebedev, L. P., Altenbach, H.; Foundations of Micropolar Mechanics; Springer-Verlag; Berlin, 2013.
- [4] Grbčić, S.; Linked Interpolation and Strain Invariance in Finite-Element Modelling of Micropolar Continuum, PhD Thesis; Rijeka, 2018.
- [5] Gauthier, R. D., Jahsman, W. E.; A Quest for Micropolar Elastic Constants, Journal of Applied Mechanics; 42(2):369-374, 1975.
- [6] Grbčić, S.; Quadrilateral 2D linked-interpolation finite elements formicropolar continuum, Acta Mechanica Sinica, 2019, DOI: 10.1007/s10409-019-00870-1

FORMFOLD PAVILION – BUILDING FREE-FORM PAVILION SCALE MODEL BY USING PARAMETRIC MODELLING AND DIGITAL FABRICATION

FORMFOLD PAVILJON – IZRADA MAKETE SLOBODNO OBLIKOVANOGA PAVILJONA KORISTEĆI PARAMETARSKO MODELIRANJE I DIGITALNU PROIZVODNJU

Elizabeta Šamec¹, Milena Stavrić², Albert Wiltsche²

(1) Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, esamec@grad.hr

(2) Institute of Architecture and Media, Faculty of Architecture, Graz University of Technology, Austria mstavric@tugraz.at, wiltsche@tugraz.at

Abstract

This paper presents the process of designing and fabricating a scale model of a free-form pavilion by using parametric modelling and CNC fabrication. The shape of the pavilion is designed, discretised and prepared for fabrication by using the 3D CAD modelling software *Rhinoceros*, associated with the visual programming application *Grasshopper*. The scale model is manufactured with a laser cutter and finally assembled manually. The advantages of using parametric modelling and visual programming in combination with digital fabrication for the design and manufacturing process of free-form surfaces are shown. Also, some problems related to discretisation of such surfaces for the two-dimensional fabrication process are discussed.

Keywords: free-form surface, shell, visual programming, discretisation, laser cutter

Sažetak

U radu je prikazan postupak projektiranja i izrade makete slobodno oblikovanoga paviljona koristeći se parametarskim modeliranjem i CNC proizvodnjom. Površina paviljona je modelirana, diskretizirana i pripremljena za proizvodnju u programu za 3D CAD modeliranje *Rhinoceros* s pripadajućim programom za vizualno programiranje *Grasshopper*. Za izradu makete korišten je laserski rezač, nakon čega su dobiveni dijelovi ručno spojeni. U radu su pokazane prednosti koje donose parametarsko modeliranje i vizualno programiranje u kombinaciji s digitalnom proizvodnjom tijekom postupka projektiranja i izvedbe slobodno oblikovanih ploha. Također, prikazani su i određeni problemi vezani za diskretizaciju razvedenih ploha prilikom pripreme za ravninsku izradu.

Ključne riječi: slobodno oblikovana ploha, ljuska, vizualno programiranje, diskretizacija, laserski rezač

1. Introduction

In recent decades there has been an exponential increase in the use of digital technologies as design tools, resulting in more design freedom and making non-standard, free-form architecture very popular. For free-form structures, a Computer Aided Design (CAD) tool is no longer just a representation tool, it has become a design tool that enables working with complex NURBS surfaces. By using parametric modelling, the effort needed to create and test the design variants is minimized, and therefore a family of solutions can be easily made instead of a single design solution. Designing free-form surfaces is not only interesting to architects and engineers because of their expressive forms but also because of the possibility to integrate the form in a structural system, resulting in a more sustainable design and building solutions [1, 2]. However, due to the complex geometry, free form surfaces experience difficulties in fabrication and construction. To facilitate the fabrication process, free form surfaces are discretised. The discretisation process has been improved by using parametric modelling, while by combining it with digital fabrication, non-standard architecture has become more buildable.

Hereafter, the process of designing and fabricating a scale model of the free-form structure using parametric modelling and CNC fabrication process during a weeklong workshop [3] is presented in detail. The shape is designed, discretised and prepared for fabrication by using the 3D CAD modelling software *Rhinoceros* [4], associated with the visual programming application *Grasshopper* [5]. The scale model is manufactured with a laser cutter and finally assembled manually.

2. Case Study - FormFold Pavilion

The idea for the case study is to build a free-form pavilion intended to be used as a multi-purpose community space. In order to successfully develop the design, all three components of the diagram in Figure 1 need to be considered.

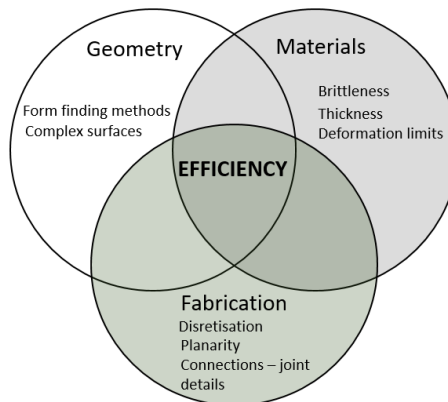


Figure 1. Trinity of design: Geometry, Materials, and Fabrication [6]

To incorporate both an interesting form and the structural system, the pavilion is designed as a shell, and its geometry is generated by using the form-finding algorithm. In order to attract the public to enjoy the enclosure in various weather conditions, the central part of the shell is lowered and perforated so that the structure can interact with both the sun and the rain (Figure 2). For fabrication purposes, the shell's geometry is discretised into planar elements forming strips that are cut out by a CNC machine (laser cutter). The final 3D shape of the structure is obtained by folding strips and connecting them. By using folding, the number of necessary joint elements is

reduced. To connect the strips, the connection elements in form of gluing flaps are designed. During the whole design process the characteristics of cardboard as building material are considered.

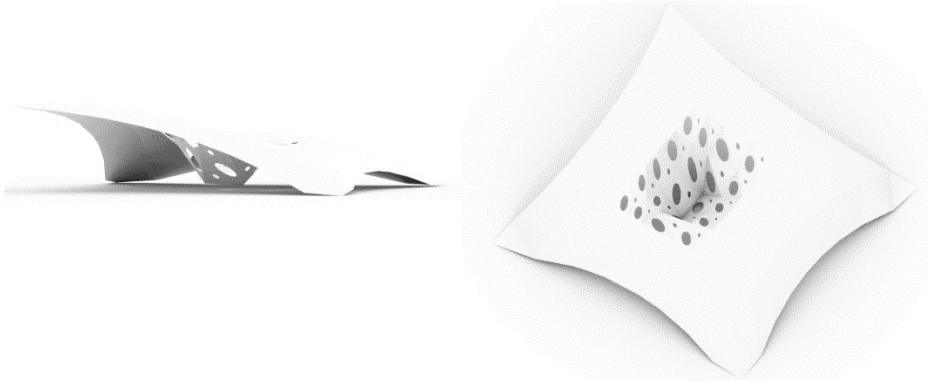


Figure 2. Initial design of the pavilion

2.1. Surface Generation

The shape of the structure is generated from the curve net obtained by using the genuine programme code based on force density method (FDM) [7]. The net is spread over a ground-plane area of 60x60 cm and its maximum height is 15 cm. The form-finding process is applied in order to obtain a self-supporting structure. To generate the surface from the obtained net, the *Curve Network* function in Grasshopper is used. The function requires two systems of curves, so the initial net is modified as shown in Figure 3.

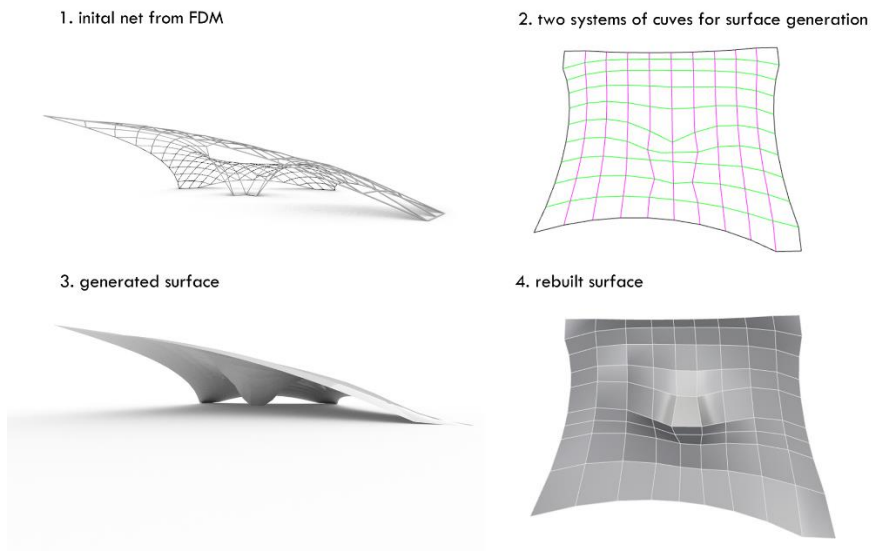


Figure 3. Surface generation

2.2. Panalisation

In order to use the 2D fabrication process to build a 3D object, planar unfolding of the model is necessary. It is straightforward to unfold a polyhedral shape consisting of planar faces, but here

the challenge is to generate a panalisation of a non-developable double curve surfaces consisting of a small number of connected pieces [8]. When performing panalisation the initial surface is approximated, and depending on the size of individual elements a greater or lesser distortion in the geometry of the set form occurs. The triangulation i.e. partitioning into triangular planar segments is the best-known method for curved surface discretisation. From the aspect of material use, quad meshing is more effective (lesser number of edges results in less load carrying members), however, it cannot be easily conducted with an arbitrary surface [9].

In our case study, discretisation was made by reconstructing the shell's geometry to consist of 9 stripes in each direction (81 elements) by using the *Rebuild* function (the degree of the u- and v-parameter lines was set to 1). However, after checking the planarity of each surface element with the *Is planar* component, it turned out that the rebuilt surface did not consist of planar elements but of hyperbolic paraboloids. Therefore, further division into triangle elements was necessary. To perform that, another *Grasshopper* script was used, containing the *Map to Surface* component in order to map the planar triangular grid on to given surface. Preparing the script enabled the input surface of the shell to be easily changed, since it was still subject to change in the design phase. By using the same *Map to Surface* component, perforations can also be made. In this case, circles with different radii were mapped onto the central part of the shell in order to perforate it.

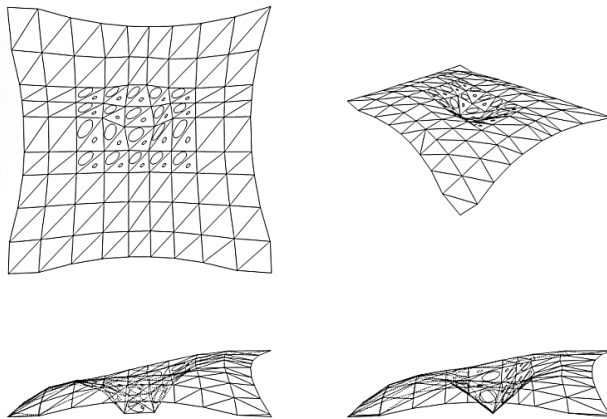


Figure 4. Discretisation and perforation of the central part of the surface

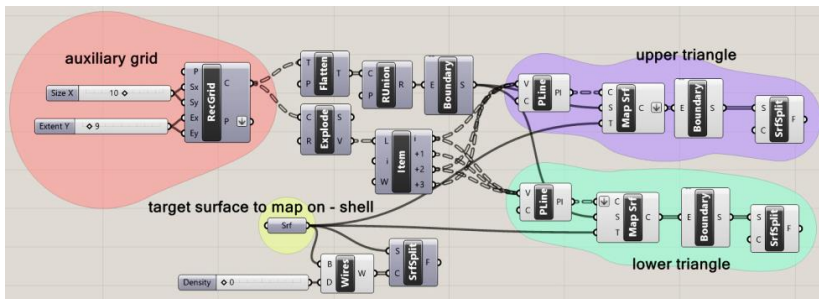


Figure 5. Discretisation using the *Map to Surface* component in Grasshopper

2.3.Preparation for Laser Cutter and Assembly

In order to fabricate 3D geometry using a laser cutter, the surface now consisting from flat elements needs to be divided into straps and flattened using the *Unroll* function (Figure 6.). In

total, the shell is discretised in 162 flat surfaces, unrolled in 9 strips. To select the lines that need to be cut and engraved by laser, a script in *Grasshopper* (Figure 7) is once again prepared. The script also enables the connection elements, necessary to attach the stripes, to be directly drawn from unrolled geometry. The resulting DXF file (Figure 6 right) serves as an input for the CNC machine i.e. laser cutter.

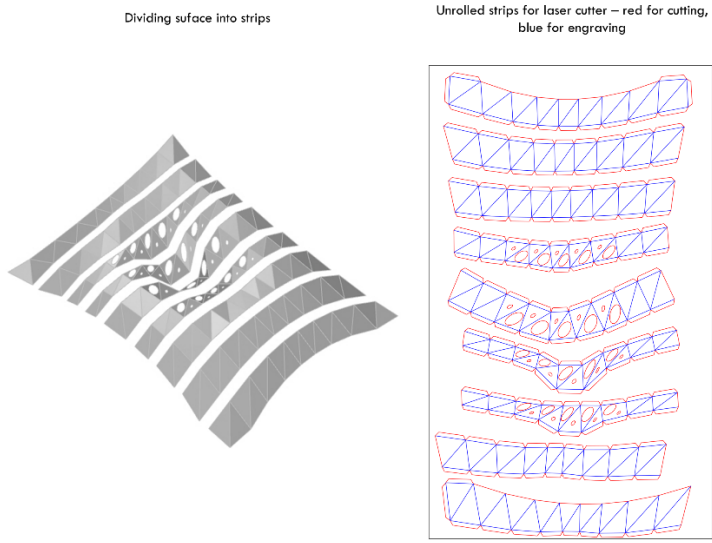


Figure 6. Dividing the surface into stripes and unrolling them for fabrication using a laser cutter

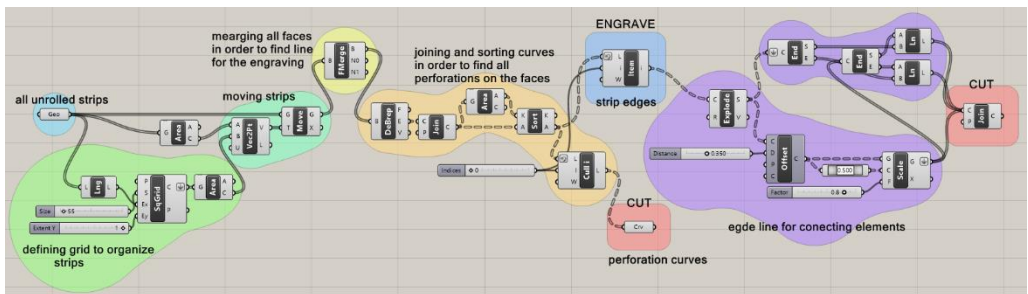


Figure 7. Grasshopper file for laser cutter preparation

The stripes are cut from a single piece of cardboard, and the lines to fold the connection elements are engraved. The inner folding lines that define the final 3D geometry can appear on both sides of the cardboard depending on the concavity or convexity of the surface. Therefore, the *Convex Edges* component is used to define the curvature of each folding curve. Finally, the cardboard is folded, and stripes are connected together using a stapler (Figure 8 and 9).

3. Conclusion

Discretisation and digital fabrication of free-form surfaces is a hot research topic due to the possibilities that digital technology has brought to architectural design. In this case study, due to the short timeline of the workshop, most commonly used triangular discretisation was performed, without using any discretisation algorithm. However, the use of parametric modelling in the design phase has brought two key benefits. First, by generating an automated process, discretisation of free-form surface was easily made, minimizing the effort needed to create and test the design

variants. And second, tedious repetitive drawing tasks necessary in order to prepare the 3D surface to be fabricated from a flat piece of cardboard using a laser cutter were eliminated.

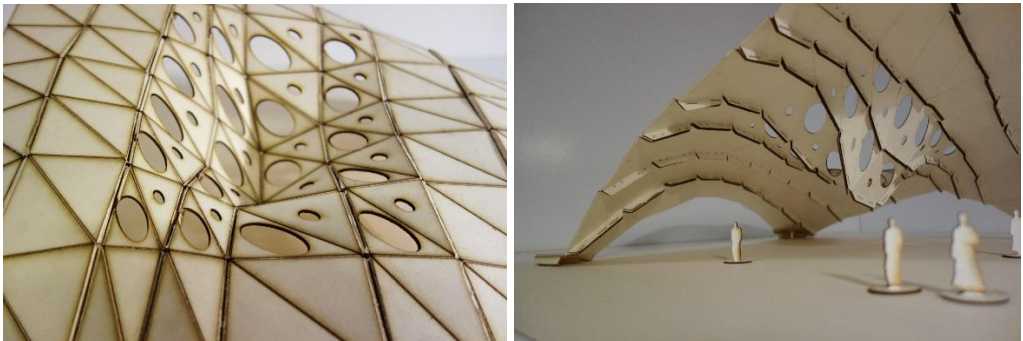


Figure 8. Assembled shell – top and front view

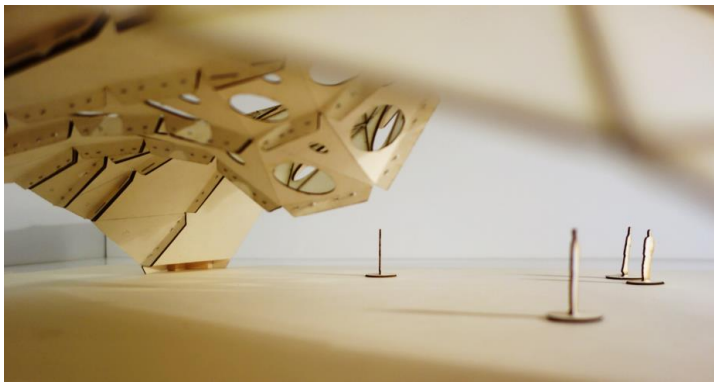


Figure 9. Inside view

References

- [1] Popescu, M., Rippmann, M., Liew, A., Van Mele, T. and Block P.: Concrete shell built using a cable-net and knitted formwork, *DETAIL structure*, vol.1, 2019., (10-11)
- [2] Šamec, E., Srivastava, A. and Chaltiel, S.: Light formwork for earthen monolithic shells, International Conference on Sustainable Materials, Systems and Structures (SMSS2019) Challenges in Design and Management of Structures, Rovinj, Croatia, (24-31), 2019
- [3] Workshop Zagreb 2019, <https://iam.tugraz.at/en/2019/04/workshop-zagreb-2019/>, accessed: 04.07.2019
- [4] R. McNeel & Assoc., *Rhinoceros3D*, <https://www.rhino3d.com>, accessed: 10. 07. 2019
- [5] R. McNeel & Assoc., *Grasshopper*, <http://www.grasshopper3d.com>, accessed: 10. 07. 2019
- [6] Berk Aysu: A Structural Basis for Surface Discretization of Free Form Structures: Integration of Geometry, Materials and Fabrication, PhD thesis, University of Michigan, 2012
- [7] Šamec, E., Fresl, K. and Baniček, M.: Increasing efficiency of iterative application of the force density method, *Građevinar*, 69(12), 2017, (1075-1084), <https://doi.org/10.14256/JCE.2132.2017>
- [8] Pottmann, H., Asperl, A., Hofer, M. and Kilian, A.: *Architectural Geometry*, Bentley Institute Press, (531-566), 2007
- [9] Stavric, M., Wiltsche, A. and Freißling, C.: Geometric and aesthetic discretization of free form surface, Proceedings of 25th National and 2nd International Scientific Conference moNGeometrija2010, Belgrade, Serbia, 2010

PRIMJENA GRAFIČKOG POSTUPKA ODREĐIVANJA RAVNOTEŽE PROSTORNOGA ČVORA NA DISKRETNE ELEMENTE

APPLICATION OF GRAPHICAL PROCEDURE FOR EQUILIBRIUM FINDING OF A SPATIAL NODE TO DISCRETE ELEMENTS

Maja Baniček¹, Krešimir Fresl¹, Damir Lazarević¹, Mario Uroš¹

(1) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, mbanicek@grad.hr, fresl@grad.hr, damir@grad.hr, uros@grad.hr

Sažetak

U radu je analiziran skup čestica zrnatoga materijala u stabilnoj ravnoteži te statički pritisci koji se javljaju među česticama u mirovanju, pri čemu se čestice smatraju idealno glatkima, pa su zanemarene tangencijalne sile u kontaktima. Kako bi se pojednostavio problem prijenosa sila na mjestima dodira, uzeto je da čestice imaju oblik kuglica i da se svaka kuglica oslanja na druge tri kuglice. Uz navedena ograničenja dobiva se osnovni model ravnoteže jedne kuglice u mirovanju, a normalne sile u tako definiranomu kontaktu tvore statički određenu tlačnu rešetku koja drži skup kuglica u stabilnoj ravnoteži. Za sastavljanje takve tlačne rešetke mogu se primijeniti grafički postupak uravnoteženja prostornoga čvora i metoda rješavanja rešetke čvor po čvor. Na kraju rada provedena je simulacija ravnoteža kuglice u programskom paketu Abaqus metodom diskretno-konačnih elemenata te je prikazan prijenos sila na kontaktima.

Ključne riječi: grafostatika, metoda diskretnih elemenata (MDE), rešetka sila, pronalaženje ravnoteže

Abstract

The paper considers an assembly of particles of granular matter in stable equilibrium and pressures occurring at contacts of the particles, while the particles are considered as ideally smooth and tangential forces at contacts are neglected. In order to simplify the problem of contact force transmission, the particles are idealized as spherical particles and each sphere is supported by three spheres. In respect to the above restrictions, the basic model of a particle in equilibrium is obtained, and normal forces occurring at such defined contacts form a force network which ensures the assembly of particles to be in stable equilibrium. To assemble compression-only truss, it is possible to apply the graphical procedure for equilibrium finding of a spatial node and the node-by-node method for truss analysis. At the end of the paper a simulation of the equilibrium of a spherical particle is conducted using Finite-Discrete Element Method (FDEM) and software suite Abaqus and the transmission of the forces at the contacts are shown.

Keywords: Graphic Statics, Discrete Element Method (DEM), force network, equilibrium finding

1. Uvod

Metode grafostatike služe za rješavanje statičkih problema kao što su statička ekvivalencija zadanoga sustava sila ili globalna ravnoteža konstrukcijskoga sistema. One se temelje na geometrijskoj konstrukciji dvaju recipročnih planova, plana položaja i plana sila. U planu položaja prikazuju se geometrija konstrukcije (položaj unutarnjih čvorovi i ležajeva, duljine elemenata te položaj vanjskih opterećenja), dok se u planu sila ravnoteža unutarnjih čvorova i globalna ravnoteža prikazuju pomoću poligona sastavljenih od vektora.

Grafostatičke metode razvijene su u 19. stoljeću, a upotrebljavale su se uglavnom za rješavanje ravninskih statičkih problema. Zbog dugotrajnoga i kompleksnog postupka koji se provodi korak po korak, ove metode nisu mogle biti primijenjene na složenije prostorne konstrukcije. Zahvaljujući naprednim računalima i alatima za kompjutorsku grafiku, današnja grafostatika je prostorna, a postoji više pristupa i svi se temelje na računalnoj realizaciji neke od metoda predloženih u 19. stoljeću. Primjerice, u poliedralnoj grafostatici sile se prikazuju stranama poliedra okomitima na pravce njihova djelovanja i ploština proporcionalnih njihovim intenzitetima ([1] i literatura tamo navedena). U vektorskoj pak grafostatici plan je sila sastavljen od prostornih poligona dobivenih zbrajanjem vektora ([2] i literatura tamo navedena). Još je jedan od mogućih pristupa je prostorna grafostatika utemeljena na Plückerovoj pravčastoj geometriji [3], Möbiusovu načelu dualnosti [4] i Grassmannovoj algebri [5], a detaljniji opis tog pristupa može se naći u radu [6].

Današnja grafostatika svoju primjenu nalazi ponajviše u proračunu prostornih rešetaka štapovi kojih su spojeni kuglastim zglobovima, te se takvim konstrukcijskim elementima prenose samo uzdužne tlačne ili vlačne sile. Postoje dvije dobro poznate metode rješavanja rešetaka, a to su metoda presjeka i metoda čvorova – rješavanja čvor po čvor.

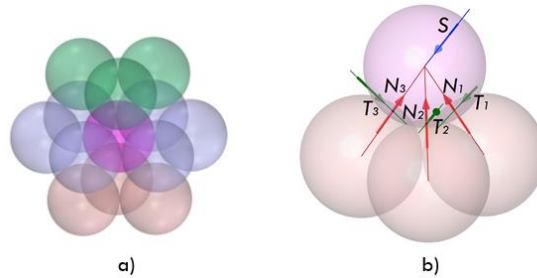
U metodi diskretnih elemenata (eng. *Discrete Element Method* – DEM) zrnati se materijal aproksimira skupom diskretnih elemenata (čestica) koji se promatraju kao zasebni elementi, a složeno globalno ponašanje zrnatoga materijala određeno je jednostavnim zakonima interakcije pojedinih diskretnih elemenata [7].

Statički pritisci koji se javljaju na mjestima dodira čestica tvore rešetku tlačnih sila koja osigurava stabilnu ravnotežu hrpe čestica. Uvođenjem određenih ograničenja može se dobiti statički određena rešetka za čije se sastavljanje može primijeniti metoda rješavanja rešetke čvor po čvor uz grafostatički postupak rješavanja ravnoteže prostornoga čvora. Na taj se način mogu u zrnatom materijalu uočiti kritična mjesta na kojima se javljaju velike tlačne sile. Primjerice, u zastornoj prizmi željezničkoga kolosijeka izrađenoj od zrna tucanika mogao bi se dobiti uvid u ponašanje kolosiječnoga zastora pod djelovanjem opterećenja koje se javlja tijekom eksploatacije, pri prolazu vlaka. Problemi koji se javljaju zbog prevelikih sila pritiska u zastornoj prizmi i prednosti metode diskretnih elemenata u rješavanju tog problema detaljnije su opisani u radu [8].

2. Diskretni elementi

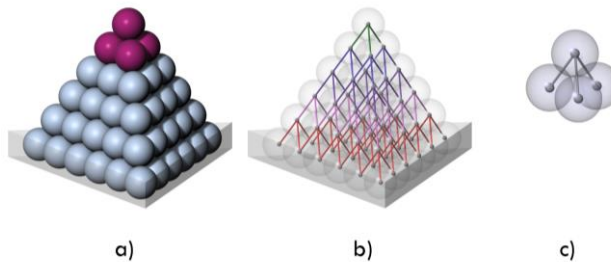
2.1. Model ravnoteže čestice

Radi pojednostavljenja prijenosa sila među česticama, u ovom ćemo radu čestice idealizirati krutim kuglicama. Ako primijenimo pristup opisan u radu [9], postoje tri vrste kontakata koje promatrana kuglica ostvaruje u stabilnoj hrpi, a to su: (i) kontakti koji pridonose opterećenju promatrane kuglice, dakle kontakti pri kojima kuglica predstavlja oslonac susjednim kuglicama i preuzima njihovo opterećenje (kontakti sa zelenim kuglicama na slici 1a), (ii) kontakti koji predstavljaju oslonce promatrane kuglice (kontakti sa crvenim kuglicama na slici 1a), (iii) kontakti koji ne preuzimaju nikakvu silu, a to su granični kontakti koji ne dopuštaju kuglici nikakav pomak u smjeru takvog kontakta (kontakti s plavim kuglicama na slici 1a). Uzmemo li u obzir navedene vrste kontakata koje kuglica ostvari u hrpi, dolazimo do konačnoga modela ravnoteže jedne kuglice prikazanoga na slici 1b).



Slika 1. a) vrste kontakata sa susjednim kuglicama koje kuglica ostvaruje u hrpi, b) konačni model ravnoteže kuglice

Na mjestu kontakta dviju čestica javljaju se normalna tlačna N i tangencijalna T sila, dok se eventualne vlačne sile zbog kohezije mogu zanemariti. Ako uvedemo uvjet da su kuglice idealno glatke, koeficijent trenja je $\mu=0$, pa je i tangencijalna sila $T=0$. Ovim ograničenjem u kontaktu ostaju samo normalne tlačne sile formirajući rešetku tlačnih sila koje drže hrpu čestica u stabilnom položaju (slika 2b). Da bi ta rešetka bila statički određena, svaka kuglica smije imati najviše tri susjedne kuglice (slika 2c). Na taj način se formira „tronožac“ kao aproksimacija modela ravnoteže jedne kuglice. Sam tronožac predstavlja statički određeni problem prostornoga čvora, pa se rešetka može sastaviti čvor po čvor. Ako je broj susjednih kuglica veći od tri, problem prostornoga čvora postaje statički neodređen, što rezultira statičkom neodređenošću same rešetke.



Slika 2. a) hrpa diskretnih čestica u ravnoteži, b) tlačna rešetka hrpe čestica u stabilnoj ravnoteži, c) aproksimacija stabilne ravnoteže jedne čestice ravnotežom čvora prostorne tlačne rešetke

3. Rješavanje rešetaka grafostatičkim postupcima

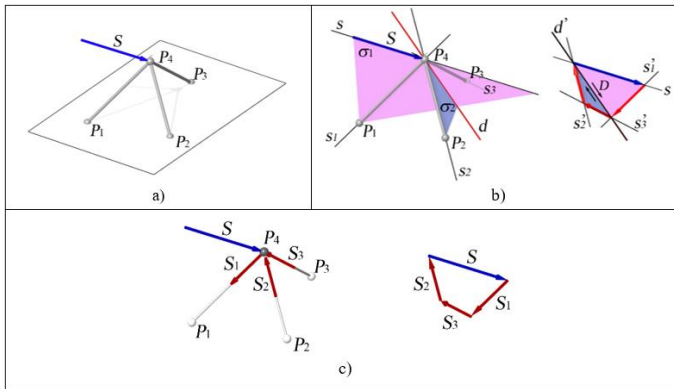
3.1. Ravnoteža prostornoga čvora

Kako bi se odredila unutarnja ravnoteža prostorne rešetke može se primijeniti metoda čvor po čvor. Za čvor zadan u planu položaja recipročan plan u planu sila prostorni je poligon sila. Grafički postupak određivanja ravnoteže prostornoga čvora opisan je u udžbeniku [10], a u ovom ćemo radu primijeniti kompjutorsku realizaciju toga postupka iz rada [11].

Za prostorni kuglasti zglobovi čvor P_4 i silu S koja djeluje na njega (slika 3a) odredit ćemo sile u štapovima kojima je čvor povezan kuglastim osloncima P_1, P_2 i P_3 za čvrstu podlogu. Kao što smo rekli, postupak se provodi u dva plana, u planu položaja (na slikama 3b) i 3c) lijevo) i u planu sila (na slikama 3b) i 3c) desno).

Rješavanje prostornoga čvora svodi se na postupak uravnoteženja četiri sile u prostoru: četiri su sile u ravnoteži ako rezultanta bilo koje dvije sile leži na pravcu djelovanja rezultante preostalih dviju sila. Pravac na kojemu leže rezultante tih dvaju parova sila presječna je dviju ravnina u

kojima leže ti parovi. Stoga, pravcem s djelovanja sile S i pravcem s_1 , koji je os štapa P_1P_4 , postavljamo ravninu σ_1 , a pravcem s_2 , koji je os štapa P_2P_4 , i pravcem s_3 , koji je os štapa P_3P_4 , postavljamo ravninu σ_2 (slika 3b), te određujemo pravac d kao presječnicu tih dviju ravnina. Na njemu će ležati rezultante $D=S+S_1$ i $-D=S_2+S_3$. Budući da su sada svi pravci djelovanja sile poznati, postupak nastavljamo u planu sile.



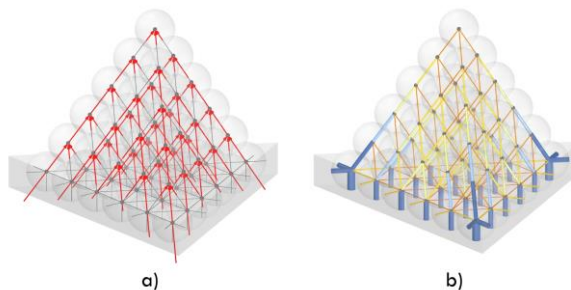
Slika 3. Ravnoteža prostornog čvora P_4 [11]

Na početak sile S u planu sile postavljamo pravac d' paralelan pravcu d , a na kraj sile S pravac s_1' paralelan pravcu s_1 . Kako je sila $D=S+S_1$ zbroj sile S i S_1 i kako sve djeluju u istoj ravnini σ_1 , sjecište pravaca d' i s_1' dat će veličine sile D i S_1 . Sada postavljamo na početak sile $-D$ pravac s_2' paralelan pravcu s_2 , a na kraj sile $-D$ pravac s_3' paralelan pravcu s_3 . Budući da svi pravci djelovanja d' , s_2' i s_3' leže u istoj ravnini σ_2 , sjecište pravaca s_2' i s_3' odredit će veličinu sile S_2 i S_3 . Na taj način smo odredili unutarnje sile S_1 , S_2 i S_3 u štapovima koje u planu sile tvore zatvoreni prostorni poligon, odnosno odredili smo ravnotežu prostornog čvora P_4 (slika 3c).

Želimo li da su sve sile u štapovima tlačne, pravac djelovanja zadane sile S mora probadati bazni trokut čiji su vrhovi oslonci P_1 , P_2 i P_3 (na slici 3a) taj uvjet nije ispunjen, pa je sila S_1 vlačna.

3.2. Primjena grafostatike na sastavljanje rešetke tlačnih sila

Slaganje rešetke tlačnih sila u stabilnoj hrpi čestica u mirovanju provodi se rastavljanjem sile (statička ekvivalencija) odozgo prema dolje, polazeći od čestice koja preuzima samo svoju vlastitu težinu i koja ne uravnotežuje niti jednu drugu česticu. Stoga, pogledamo li primjer hrpe kuglica u obliku trostrane piramide (slika 2a), to je kuglica na vrhu piramide.



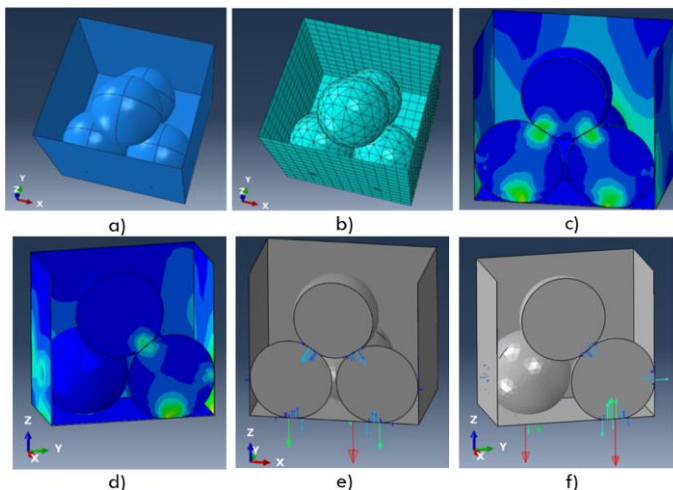
Slika 4. a) Rešetka uravnotežujućih sila, b) prikaz rasporeda i veličina tlačnih sila unutar hrpe čestica

Za stabilnu statičku ravnotežu čestice oblika kugle potrebne su minimalno tri susjedne čestice. Ako zanemarimo tangencijalne sile, ostaju samo normalne sile u kontaktima čiji pravci djelovanja

formiraju tetraedar kojemu su vrhovi središta promatranih kuglica. Takav statički sistem možemo aproksimirati čvorom prostorne rešetke i riješiti ga primjenom grafičkoga postupka opisanoga u potpoglavlju 3.1. Želimo li na isti način sastaviti cijelu rešetku, dobivene uravnotežujuće sile prenosimo s trenutno promatrane kuglice na njezine susjede te dalje istim postupkom određujemo njihove uravnotežujuće sile. Postupak nastavljamo dok ne dođemo do zadnje kuglice koja leži na čvrstoj podlozi. Konačna rešetka uravnotežujućih sila prikazana je na slici 4a), a raspored i veličine tlačnih sila unutar hrpe kuglica naznačeni su na slici 4b), pri čemu su intenziteti sila proporcionalni debljinama štapova. Kako je utjecaj trenja zanemaren, za kuglice koje leže na čvrstoj podlozi potrebni su dodatni rubni uvjeti koji će spriječiti translacijske pomake po čvrstoj podlozi. Obično se znati materijali skladište u spremnicima, pa potrebne rubne uvjete možemo postići stijenkama kutije ili fiksirati kuglice koja se nalaze u sloju u kontaktu s čvrstom podlogom.

3.3. Usporedba s metodom konačno-diskretnih elemenata

Kako bi se prikazao prijenos sila između čestica i kuglasta čestica u ravnoteži, izrađen je numerički model (slike 5a) i 5b)) u programskom paketu za inženjerske simulacije Abaqus/CAE [12] metodom konačno-diskretnih elemenata (eng. *Finite-Discrete Element Method* – FDEM) [13]. Model se sastoji od četiri deformabilne kuglice postavljene u kutiju koja ujedno predstavlja rubne uvjete, jer ne postoji trenje između čestica i podloge, a ne postoji ni kohezija među česticama. U suprotnom bi se slučaju čestice odvojile jedna od druge i izgubio bi se kontakt koji prenosi tlačne sile. Da bi kuglice bile definirane kao idealno glatke, tangencijalno ponašanje kontakta među česticama definirano je kao „Frictionless“, što znači da je koeficijent trenja $\mu=0$, pa je i tangencijalna sila u kontaktu jednaka nula, a ponašanje kontakta u normalnom smjeru definirano je kao kruto „Hard“. Za opisani model provedena je kvazistatička Abaqus/Explicit analiza, a naprezanja u kuglicama dobivena simulacijom prikazana su na slikama 5c) i 5d), te je prikazan prijenos sila u kontaktima na slikama 5e) i 5f).



Slika 5. FDEM model ravnoteže kuglice u Abaqus: a) i b) prostorni prikaz i prikaz mreže konačnih elemenata, c) i e) prikazi naprezanja u kuglicama, d) i f) prikazi prijenosa sila u kontaktima

4. Zaključak i budući rad

U radu su obrađeni diskretni elementi idealnoga oblika kugle, te su uvedena sljedeća ograničenja: a) na kontaktnoj plohi susjednih čestica zanemarene su tangencijalne sile koje se javljaju zbog trenja i b) vlačne sile su zanemarene zbog skoro nikakvoga kohezijskog međudjelovanja između čestica. Na taj smo način na kontaktnim plohama dobili samo sile pritiska pravci djelovanja kojih

prolaze kroz središta kuglica koje su u međudjelovanju. U metodi diskretnih elemenata tlačne sile koje se javljaju na mjestu dodira čestica zrnatoga materijala u statičkoj stabilnoj ravnoteži tvore tlačnu rešetku. Pokazali smo da se, uvedemo li navedena ograničenja te uz raspored kuglica koji daje statičku određenost, rešetka može sastavljati čvor po čvor.

Grafostatika ima široku primjenu ne samo na klasične konstrukcije kao što su rešetke u visokogradnji ili mostovima, a u radu je pokazana primjena i u slučajevima u kojima se problem može aproksimirati rešetkom, kao što je sastavljanje tlačne rešetke koja drži hrpu čestica (diskretnih elemenata) u stabilnoj ravnoteži.

U budućem radu uvest ćemo tangencijalne sile u kontaktnoj plohi i različite veličine čestica te zamijeniti idealizirane čestice u obliku kugle drugim oblicima kao što su poliedri i elipsoidi, kako bi se postigao izgled što sličniji zrnu tucanika od kojega se izrađuje prizma kolosiječnoga zastora. Tlačnom rešetkom dobivenom takvim česticama moći će se točnije uočiti mjesta na kojima se javljaju velike sile pritiska koje bi mogle uzrokovati pucanje ili u krajnjem slučaju drobljenje pojedinih zrna, što može rezultirati narušavanjem stabilnosti kolosiječnoga zastora.

Zahvala

Rad je izrađen u okviru projekta „Razvoj DIV elastične kopče“ referentne MIS oznake: KK.01.2.1.01.0011 koji financira Ministarstvo gospodarstva, poduzetništva i obrta RH kroz program „Jačanje konkurentnosti gospodarstva poticanjem investicija i učinkovitijim korištenjem EU sredstava“.

Literatura

- [1] Hablicsek, M., Akbarzadeh, M., Guo, Y.: Algebraic 3D graphic statics: Reciprocal constructions, *Computer-Aided Design*, vol. 108, 2019, 12 (30-41), DOI: 10.1016/j.cad.2018.08.003.
- [2] D'Acunto, P., Jasienski, J.-P., Ohlbrock, P. O., Fivet, C., Schwartz, J., Zastavni, D.: Vector-based 3D graphic statics: A framework for the design of spatial structures based on the relation between form and forces, *International Journal of Solids and Structures*, vol. 167, 2019, 13 (58-70), DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2019.02.008.
- [3] Plücker, J.: On a new geometry of space, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 155, 1865, 37 (725–791).
- [4] Möbius, A. F.: Über Eine Besondere Art Dualer Verhältnisse Zwischen Figuren Im Raume, *Journal für die Reine und Angewandte Mathematik*, vol. 10, 1833, 25 (317–341).
- [5] Grassmann, H.: A New Branch of Mathematics: The “Ausdehnungslehre” of 1844 and Other Works. Open Court Publishing, (Transl.: C. L. Kannenberg), 1995.
- [6] Kodrnja, I., Baniček, M., Fresl, K.: Line geometry and graphic statics, *Građevinar*, prihvaćeno za objavu, 2019.
- [7] Bičanić, N.: Discrete Element Methods, *Encyclopedia of Computational Mechanics*, Vol. 1: Fundamentals, John Wiley & Sons Inc., 2007., DOI: 10.1002/9781119971160.
- [8] Sluganović, V., Lakušić, S., Lazarević, D.: Track ballast modelling by discrete element method, *Građevinar*, vol 71 (7), 2019, 589–600, DOI: 10.14256/JCE.2350.2018.
- [9] Lazarević, D.: Modeliranje opterećenja spremnika pri punjenju zrnatim materijalom, *Magistarski rad*, Sveučilište Zagreb, Građevinski fakultet, 1997.
- [10] Simović, V.: *Građevna statika I*, Građevinski institut Zagreb, 1988.
- [11] Kodrnja, I., Baniček, M., Fresl, K.: Grassmann Algebra and Graphic Statics, *Future Trends in Civil Engineering*, prihvaćeno za objavu, 2019.
- [12] Dassault Systèmes: SIMULIA, User Assistance 2019., Simulia (2019)
- [13] Munjiza, A. A., Knight, E., Rougier, E.: *Computational Mechanics of Discontinua*, John Wiley & Sons Inc., 2011., DOI: 10.1002/9781119971160

CRACK BAND METODA – UTJECAJ OBLIKA KONAČNIH ELEMENATA NA NUMERIČKE REZULTATE

CRACK BAND METHOD – THE INFLUENCE OF SHAPE OF FINITE ELEMENTS ON NUMERICAL RESULTS

Anton Bogdanić¹, Joško Ožbolt²

(1) Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, anton.bogdanic@uniri.hr

(2) Sveučilište u Stuttgartu, Institut za građevinske materijale, ozbolt@iwb.uni-stuttgart.de

Sažetak

Kvazi-krhki materijali, poput betona, stijene ili keramike, odlikuju se lokalizacijom deformacija i oštećenja u relativno uskim zonama te postepenim razvojem makroskopskih pukotina. Modeliranje takvih materijala u okviru klasične teorije kontinuuma sa standardnim konačnim elementima, dovodi do osjetljivosti rezultata s obzirom na veličinu i oblik konačnih elemenata. Kako bi se osigurali objektivni rezultati, potrebno je upotrijebiti prikladnu regularizacijsku tehniku. Crack band metoda često se koristi kao metoda koja eliminira, ili točnije smanjuje, osjetljivost rezultata na odabir mreže konačnih elemenata. Cilj ovog rada je ukratko objasniti načela na kojima se metoda temelji te istražiti na koji način oblik 3D konačnih elementa utječe na numeričke rezultate, ukoliko se volumen elemenata koristi kao kriterij za procjenu širine zone lokalizacije.

Ključne riječi: kvazi-krhki materijali, beton, lokalizacija oštećenja, regularizacijske tehnike, crack band metoda

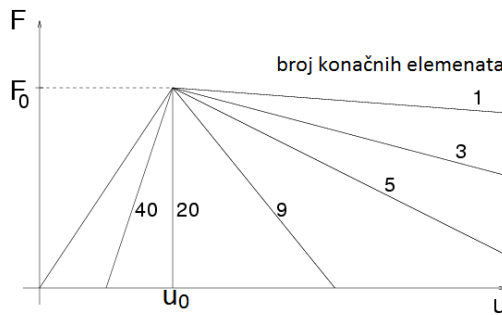
Abstract

Quasi-brittle materials, such as concrete, rock or ceramics, are characterized by the localization of strain and damage in relatively narrow zones and with gradual development of macroscopic stress-free cracks. The modeling of such materials in the framework of standard continuum theory together with standard finite elements, leads to sensitivity of the results on the size and shape of finite elements. In order to assure objective results, it is mandatory to employ appropriate regularization technique. The crack band method is frequently used technique to eliminate, or more precisely reduce, mesh sensitivity. The goal of this paper is to briefly explain principles on which the method is based and investigate how the shape of 3D finite elements affects the numerical results, if the element volume is used as a criteria to estimate the crack band width.

Keywords: quasi-brittle materials, concrete, damage localization, regularization techniques, crack band method

1. Uvod

Omekšanje materijala najčešće dovodi do lokalizacije deformacija, pri čemu se u inicijalno glatkoj raspodjeli deformacija nakon određenog kritičnog trenutka javljaju uske zone s velikim deformacijama. Uzrok omekšanja je srastanje i postepeno širenje oštećenja u materijalu poput šupljina i pukotina. Dakle, ovakvo ponašanje obilježeno je značajnim promjenama u strukturi materijala, a tipično je za kvazi-krhke materijale u koje spada i beton. Materijali za koje je tipična lokalizacija deformacija zahtjevniji su za modeliranje. Razlog leži u činjenici da omekšanje materijala u okviru standardnog Boltzmanovog kontinuuma dovodi do ozbiljnih matematičkih i numeričkih problema. S matematičkog stajališta dolazi do gubitka eliptičnosti pripadajućih diferencijalnih jednačbi, pri čemu rubna zadaća postaje loše uvjetovana, tj. nema jedinstveno rješenje. S numeričkog stajališta, loša uvjetovanost manifestira se osjetljivošću rezultata na veličinu konačnih elemenata. Ovakvo ponašanje vrlo se zorno može prikazati na primjeru štapa duljine L koji je podijeljen na N jednodimenzionalnih linearnih konačnih elemenata [1]. Uz pretpostavku da se najslabiji presjek nalazi na sredini štapa, zona omekšanja lokalizira se u jednom elementu. Slika 1 prikazuje vrlo izraženu ovisnost dijagrama sila-pomak o broju konačnih elemenata, tj. s povećanjem broja elemenata padajuća grana dijagrama sve se više približava početnoj elastičnoj grani. Ako broj elemenata teži u beskonačnost, zona u kojoj se deformacija lokalizira postaje beskonačno mala, a disipacija energije teži k nuli.



Slika 1. Utjecaj broja konačnih elemenata na numeričke rezultate [1]

Ovakvo ponašanje numeričkih modela fizikalno nije dopustivo i potrebno je na neki način eliminirati ovaj problem, tj. potrebno je upotrijebiti regularizacijske tehnike.

1.1. Regularizacijske tehnike

Prilikom modeliranja materijala kod kojih se javlja lokalizacija deformacija postoji nekoliko načina pomoću kojih se može poboljšati objektivnost numeričkih rezultata [2]. Prva mogućnost je primjena modela temeljenih na nelokalnom ponašanju materijala gradijentnog ili integralnog tipa, pri čemu naprezanje u nekoj točki kontinuuma ne ovisi samo o deformaciji i ostalim varijablama u toj integracijskoj točki, nego i o podacima integracijskih točaka koje ju okružuju. No, zbog nelokalnog karaktera ovakav pristup komplicira postupak proračuna. Nadalje, objektivnost rezultata moguće je postići modeliranjem u okviru kontinuuma višeg reda poput Cosserat kontinuuma [3], pri čemu karakteristične duljine postaju dio konstitutivnog zakona i predstavljaju strukturu materijala. Posljednji i najjednostavniji pristup omogućuje tzv. crack band metoda [4], koja je u nastavku ovog rada detaljnije opisana, a uz pomoć kratke 3D numeričke parametarske analize biti će prikazani neki nedostaci ove metode.

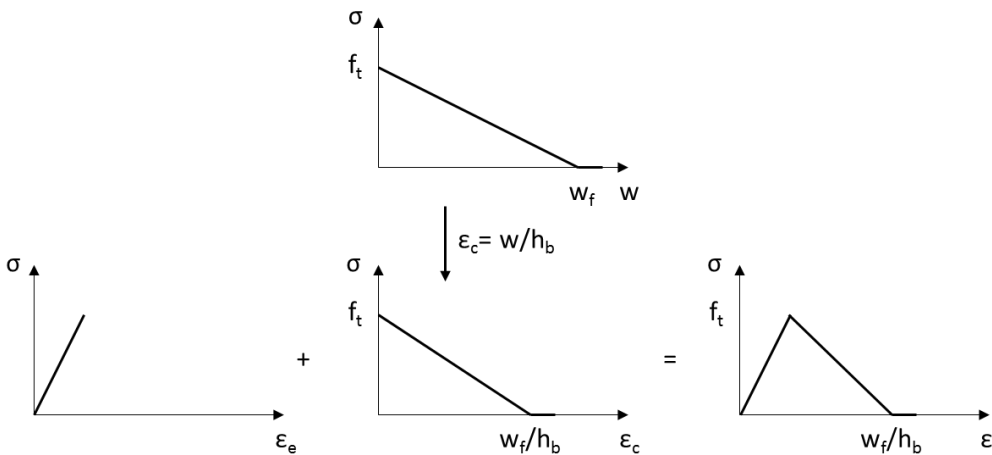
2. Crack band metoda

Osnovna prednost crack band metode je činjenica da formulacija problema ostaje lokalnog karaktera, te se zbog svoje jednostavnosti vrlo često koristi u inženjerskim softverima. S druge strane, najveći nedostatak ove metode je neobjektivnost rezultate prilikom dominantno posmičnog tipa sloma.

Osnovna ideja je korištenje konstitutivnog zakona koji se koristi kod metode kohezivnih pukotina (eng. *traction-separation law*). No, za razliku od metode kohezivnih (diskretnih) pukotina, gdje je pretpostavka da se pukotina lokalizira u jednoj liniji ili plohi, u metodi razmazanih pukotina pretpostavlja se lokalizacija deformacija u zoni širine h_b . Stoga se u svakoj materijalnoj točki odgovarajući konstitutivni zakon naprezanje-deformacija dobiva preko transformacije polaznog σ - w dijagrama na kojemu površina ispod krivulje odgovara energiji loma. Na slici 2 prikazana je transformacija dijagrama za najjednostavniji slučaj s linearnim omekšanjem. Kako bi rezultat numeričke analize bio objektivan, konstitutivni zakon naprezanje-deformacija potrebno je povezati sa širinom zone h_b na način da je specifična energija potrebna za formiranje pukotine jednaka energiji loma:

$$h_b \int_0^{w_f/h_b} f(\sigma, \varepsilon) d\varepsilon = G_f. \quad (1)$$

Pri tome treba naglasiti da širina zone h_b ovisi o veličini, obliku i orijentaciji konačnih elemenata, a pravilno određivanje te veličine izuzetno je bitno ukoliko se želi postići objektivnost rezultata.



Slika 2. Transformacija konstitutivnog zakona u ovisnosti o širini zone lokalizacije

Postoji nekoliko kriterija za određivanje širine zone u kojoj dolazi do lokalizacije deformacija:

- Volumen (3D analiza) i površina (2D analiza) konačnih elemenata
- Metoda projekcije
- Metode predložene od strane Olivera [5]

U komercijalnim softverima najčešće je korišten prvi navedeni kriterij, tj. određivanje širine zone preko volumena ili površina konačnih elemenata. Za heksaedarske konačne elemente najčešće se koristi sljedeća relacija:

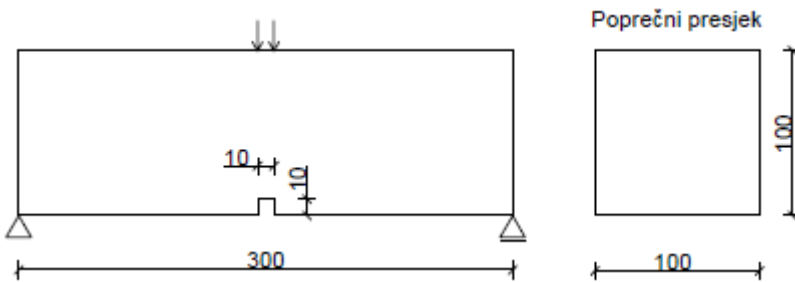
$$h_b = \sqrt[3]{V}. \quad (2)$$

Izraz (2) jasno ukazuje da ovaj kriterij daje točnu procjenu jedino ukoliko su konačni elementi pravilni, a k tome mora biti zadovoljen i uvjet da se smjer pružanja pukotine poklapa s orijentacijom elemenata. U tom slučaju rezultati ne ovise o veličini konačnih elemenata, a dokaz se može pronaći u [2]. No, ukoliko se isti izraz koristi za elemente koji nisu u potpunosti pravilni, može se očekivati neobjektivnost numeričkih rezultata. Ova hipoteza potvrđena je u sljedećem poglavlju.

Preostale dvije skupine kriterija daju bolje procjene, ali su ujedno i kompliciraniji za implementaciju. Detaljan opis ovih metoda i njihovu djelotvornost moguće je pronaći u [6], gdje je provedena opširna analiza za slučaj 2D konačnih elemenata.

3. Utjecaj oblika konačnih elemenata na numeričke rezultate

U ovom poglavlju prikazani su rezultati kratke 3D numeričke parametarske analize pomoću 3D FE programa MASA, čija je osnovna namjena trodimenzionalni nelinearni proračun betonskih i armiranobetonskih konstrukcija [7]. Analiziran je utjecaj oblika konačnih elemenata na numeričke rezultate, i to za linearne heksaedarske i tetraedarske elemente. Promatrana je prosta betonska greda sa zarezom na sredini raspona koji definira mjesto formiranja pukotine. Dimenzije grede prikazane su na Slici 3 i korištene su identične dimenzije u svim simulacijama. Materijalne karakteristike betona korištene u simulacijama dane su u Tablici 1.



Slika 3. Dimenzije proste grede korištene u numeričkim simulacijama

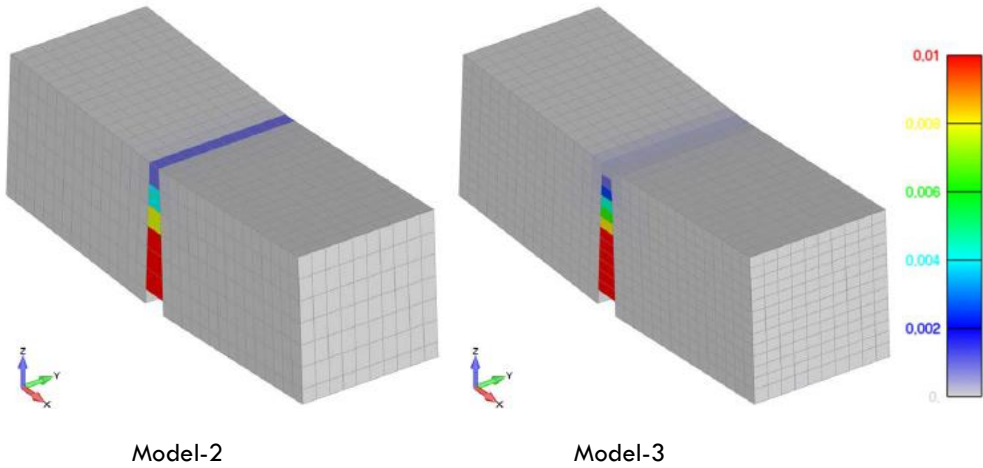
Tablica 1. Materijalne karakteristike betona

Modul elastičnosti [GPa]	Poissonov koeficijent [-]	Tlačna čvrstoća [MPa]	Vlačna čvrstoća [MPa]	Energija loma [J/m ²]
26,60	0,18	24,60	2,38	74

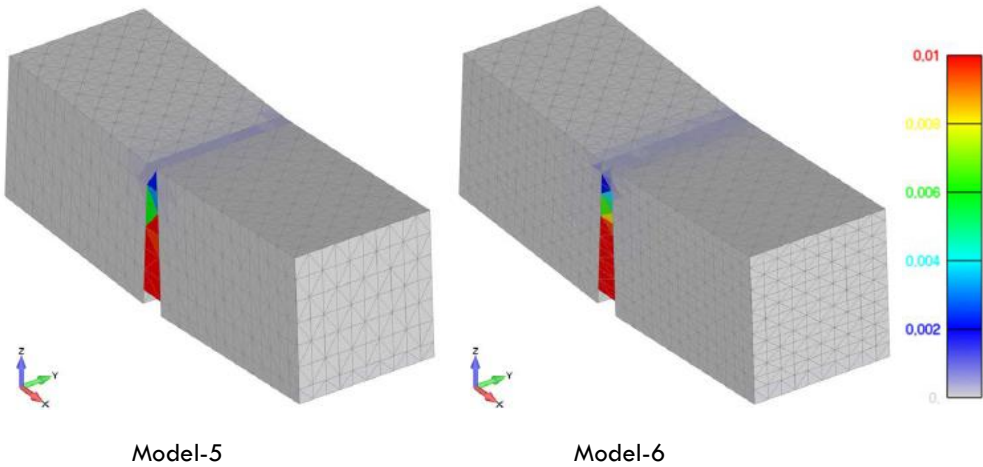
Parametri koji su se varirali prikazani su u Tablici 2. Kako bi se istražio utjecaj promjene oblika elemenata, varirao se samo broj podjela po visini grede iznad zarezom, dok su u preostala dva smjera dimenzije elemenata zadržane konstantne. Model-1 i Model-4 imaju pravilne elemente u zoni lokalizacije deformacija. Na Slici 4 prikazani su Model-2 i Model-3 kako bi se ilustrirala promjena oblika konačnih elemenata, a ujedno su prikazane i lokalizacijske zone u pogledu glavnih vlačnih deformacija za isti proračunski korak u simulacijama. Na Slici 5 uspoređeni su modeli s tetraedarskim konačnim elementima.

Tablica 2. Parametri varirani u numeričkoj analizi

	Model-1	Model-2	Model-3	Model-4	Model-5	Model-6
Tip elementa	Heksaedar	Heksaedar	Heksaedar	Tetraedar	Tetraedar	Tetraedar
Broj podjela po visini grede iznad zarezom	9	6	12	9	6	12



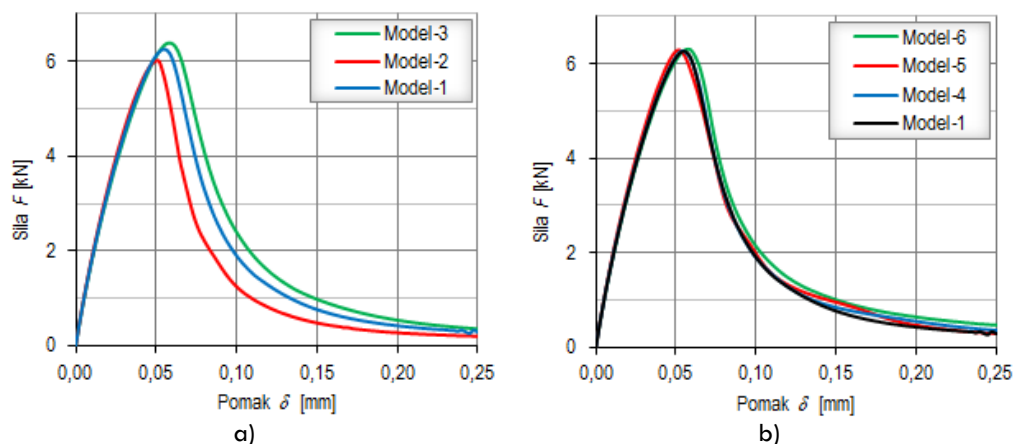
Slika 4. Usporedba modela s heksaedarskim elementima i prikaz lokalizacijske zone



Slika 5. Usporedba modela s tetraedarskim elementima i prikaz lokalizacijske zone

Na Slici 6a) prikazani su rezultati za modele s heksaedarskim elementima. Prema očekivanjima, vidljiva je ovisnost rezultata o mreži konačnih elemenata. Model-3 s najvećim brojem podjela po visini grede pokazuje najduktilnije ponašanje. Razlog leži u činjenici što je volumen konačnih elemenata u tom slučaju najmanji, što direktno utječe na manju proračunatu širinu zone lokalizacije i posljedično na duktilniji konstitutivni zakon naprezanje-deformacija u integracijskim točkama.

Na Slici 6b) prikazane su krivulje sila-pomak za modele s tetraedarskim elementima te za referentni slučaj, tj. Model-1. Može se vidjeti da Model-1 i Model-4 pokazuju vrlo dobro podudaranje rezultata, što je i očekivano jer su u oba slučaja elementi pravilni. No, rezultati pokazuju vrlo mala odstupanja i za ostale modele s tetraedarskim elementima. Razlog leži u činjenici da modeli s tetraedarskim elementima imaju puno više elemenata u zoni lokalizacije pa im se volumen prilikom promjene podjela po visini grede značajno ne mijenja.



Slika 6. a) Rezultati numeričke analize za modele s heksaedarskim elementima b) Rezultati numeričke analize za modele s tetraedarskim elementima te za referentni model

4. Zaključak

Prilikom modeliranja kvazi-krhkih materijala u okviru klasičnog kontinuuma javlja se numerički problem osjetljivosti rezultata na odabir mreže konačnih elemenata uslijed lokalizacije deformacija. Kako bi se postigla objektivnost rezultata potrebno je implementirati regularizacijsku tehniku kako bi se spriječilo lokaliziranje deformacija u beskonačno male zone. U okviru ovog rada ukratko je opisana najjednostavnija regularizacijska metoda, tzv. crack band metoda. Nadalje, provedena je kratka 3D numerička parametarska analiza kako bi se istražio utjecaj različitih oblika konačnih elemenata na objektivnost rezultata kada se kao kriterij za određivanje širine zone lokalizacije koristi volumen konačnih elemenata. Pokazano je da taj kriterij, iako vrlo jednostavan, ne daje u potpunosti objektivne rezultate za elemente koji nisu pravilni. Korisnik programa koji se bazira na ovoj metodi regularizacije trebao bi biti svjestan koje probleme ona sa sobom nosi i kako bi se ti problemi mogli ograničiti.

Literatura

- [1] Jirásek, M.: Nonlocal theories in continuum mechanics, *Acta Polytechnica*, vol. 44(5-6), 2004, pp. 16-34
- [2] Ožbolt, J., Gambarelli, S.: Microplane model with relaxed kinematic constraint in the framework of micro polar Cosserat continuum, *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 199, 2018, pp. 476–488, DOI: [10.1016/j.engfracmech.2018.06.012](https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.06.012)
- [3] Cosserat, E., Cosserat, F.: *Theorie des corps deformables (Theory of deformable bodies)*, A. Herrman et Fils, Paris, 1909.
- [4] Bažant, Z.P., Oh, B.H.: Crack band theory for fracture of concrete, *Materials and Structures (RILEM)*, vol. 16(3), 1983, pp. 155-177
- [5] Oliver, J.: A consistent characteristic length for smeared cracking models, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 28, 1989, pp. 461-474
- [6] Jirásek, M., Bauer, M.: Numerical aspects of the crack band approach, *Computers & Structures*, vol. 110, 2012, pp. 60-78
- [7] Ožbolt, J., Li, Y., Kožar, I.: Microplane model for concrete with relaxed kinematic constraint, *International Journal of Solids and Structures*, vol. 38(16), 2001, pp. 2683-2711

OŠTEĆENJE MIKROSTRUKTURE BETONA S PEPELOM DRVNE BIOMASE PRI DJELOVANJU SMRZAVANJA I ODMRZAVANJA

MICROSTRUCTURE DETERIORATION OF WOOD BIOMASS ASH CONCRETE DUE TO FREEZE - THAW ACTION

Jelena Šantek Bajto¹, Nina Štirmer¹, Iva Ereš¹

(1) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski Fakultet, Zavod za materijale, jbjajto@grad.hr

Sažetak

Minimiziranje emisija stakleničkih plinova i ovisnosti o fosilnim gorivima predstavlja temelj svih europskih klimatskih i energetskih strategija. Posljedično, obnovljivi izvori energije (OIE) postaju sve konkurentniji fosilnim gorivima, istovremeno se boreći ne samo s klimatskim promjenama već i s rastućom potražnjom za energijom. Drvo i druge vrste krute biomase nalaze se pri samom vrhu ljestvice korištenja OIE u Europskoj uniji. Posljedica povećanog korištenja drvne biomase kao održivog goriva su znatne količine pepela (PDB). PDB nastaje kao nusproizvod izgaranja biomase čije zbrinjavanje trenutno većinom obuhvaća izravno odlaganje na odlagališta. Takvo ekonomski i ekološki neodrživo gospodarenje PDB-om zahtijeva žurno rješavanje ovog problema. Ovim istraživanjem želi se prikazati mogućnost primjene PDB-a kao vrijednog resursa za proizvodnju građevinskih materijala. Analizirana je trajnost betona, odnosno njegova otpornost na smrzavanje u agresivnom okolišu, koristeći PDB kao zamjenu za dio cementa. Uspoređeni su rezultati dobiveni indirektnom mikroskopskom analizom i direktnom metodom izlaganja betona smrzavanju sa solima.

Ključne riječi: drvna biomasa, leteći pepeo, otpornost betona na smrzavanje/odmrzavanje, faktor razmaka pora, ljuštenje

Abstract

Minimizing greenhouse effect and dependence on fossil fuels is the foundation of European climate and energy strategies. Renewable energy sources (RES) are becoming increasingly competitive with fossil fuels, fighting climate change and energy demands. Wood and other types of solid biomass are at the top of the RES usage scale in the European Union. As a result of the increased use of wood biomass, significant amounts of ash (WBA) are being generated. WBA is a by-product produced by combustion of biomass, whose management currently mainly involves direct disposal to landfills. Such economically and ecologically unsustainable management requires feasible solutions. This research aims to categorize WBA as a valuable resource in building materials. Examination of resistance to freezing in aggressive environment was performed while using WBA as a partial cement replacement. Comparative results were obtained by indirect microscopic analysis and direct exposure method of freezing-thawing with de-icing salts.

Keywords: wood biomass, fly ash, resistance of concrete to freeze/thaw, spacing factor, scaling

1. Uvod

Kako bi se osigurala temeljita preobrazba europskog energetskog sustava, postavljeni su ambiciozni ciljevi za sve zemlje članice Europske unije (EU), koji između ostalog obuhvaćaju i korištenje min. 32 % obnovljivih izvora energije do 2030. godine [1]. Čvrsta i plinovita biomasa, poglavito drvo i drveni otpad, najznačajniji je izvor obnovljive energije u EU [2], što podupire europski plan za potpuno zatvaranje energana na ugljen do 2030. godine. Razvoj strategije za izbacivanje ugljena iz upotrebe u energetici rezultirao bi povećanim korištenjem drvene biomase kao održivog goriva, pritom stvarajući velike količine pepela (PDB). Procjenjuje se da će dostizanje udjela od samo 20 % obnovljivih izvora energije do 2020. godine, utvrđenog Direktivom 2009/28/CE, u EU-u rezultirati godišnjom proizvodnjom od približno 15,5 milijuna tona pepela biomase [3]. Dugoročnom strategijom EU do 2050. godine želi se postići ugljična neutralnost i tako osigurati prelazak na „zeleno“ konkurentno gospodarstvo [4]. Iskorištavanje bioenergije može značajno doprinijeti postizanju ambicioznih europskih ciljeva, pod uvjetom da se biomasa proizvodi i koristi na održiv način [5, 6]. Činjenica da se drvena biomasa smatra obnovljivim, ugljično neutralnim izvorom energije smješta ju na sam vrh ljestvice obnovljivih izvora energije u EU s većinskim udjelom od 59 % svih obnovljivih izvora energije [6, 7]. Posljedica povećanja broja energana na biomasu je nastanak velikih količina pepela kao nusproizvoda prilikom izgaranja drvene biomase. Trenutna praksa gospodarenja PDB-om u Europi i Hrvatskoj zasniva se većinom na odlaganju PDB-a na odlagališta, što predstavlja veliki ekonomski i ekološki problem. Donošenjem novog „Paketa o otpadu“, koji između ostalog donosi izmjene Direktive o otpadu i Direktive o odlagalištima otpada [8, 9], EU također podupire minimiziranje odlaganja otpada na odlagalištima. Stoga je plansko i odgovorno gospodarenje PDB-om vrlo aktualno pitanje koje zahtijeva adekvatno rješenje. Cilj ovog rada je, u sklopu istraživačkog projekta TAREC² *Transformacija pepela iz drvene biomase u građevne kompozite s dodanom vrijednošću* (financiranom od Hrvatske zaklade za znanost), prikazati utjecaj PDB-a na mikrostrukturu betona pri djelovanju ciklusa smrzavanja i odmrzavanja sa solima.

2. Eksperimentalni dio

2.1. Materijali

Za izradu betonskih mješavina korišteni su vezivo odnosno mješavina cementa i PDB-a, agregat, voda i kemijski dodatak aerant. Korišteni su leteći pepeli nastali kao nusproizvod pri izgaranju drvene biomase u 3 različita postrojenja u Hrvatskoj (Slika 1). Kao vezivo je upotrijebljen obični portlandski cement CEM I 42,5 R. Korišten je drobljeni dolomit granulacije 0 – 4 mm (50 %), 4 – 8 mm (19 %) i 8 – 16 mm (31 %) i voda iz gradskog vodovoda. Sve mješavine izrađene su s dodatkom aeranta s udjelom od 0,05 % mase cementa.



Slika 1 Uzorci korištenih PDB-a

PDB-i korišteni u ovom radu prikupljeni su u energanama u kojima se primjenjuje tehnologija izgaranja na rešetki te izgaranje u letu. Vrsta biomase koju koriste kao sirovinu je netretirana drvena sječka, ostaci od pridobivanja drveta te otpad drvene industrije pri čemu su najzastupljenije vrste drveta bukva, hrast i grab. Tablica 1 prikazuje kemijski sastav PDB-a i cementa korištenih

pri izradi mješavina te letećeg pepela nastalog izgaranjem ugljena. Vidljivo je da se kemijski sastav PDB-a razlikuje od kemijskog sastava letećeg pepela od ugljena pa se postojeći propisi za uporabu letećeg pepela u betonu (HRN EN 450-1) pri korištenju PDB-a u betonu mogu primijeniti samo kao smjernice. Naime, norma HRN EN 450-1 obuhvaća samo primjenu letećeg pepela dobivenog suspaljivanjem drvene biomase sa fosilnim gorivima.

Tablica 1. Kemijski sastav korištenih PDB-ova i letećeg pepela od ugljena

Sastojak [% mas.]	PDB 1	PDB 2	PDB 3	Leteći pepeo od ugljena	Kriteriji prema HRN EN 450-1 [10]	CEM I 42,5 R
pH vrijednost (eluat)	13,15	13,45	12,87	12,50	-	12,86
SiO ₂	18,19	16,77	49,34	68,21	-	21,88
Al ₂ O ₃	3,14	2,53	12,42	29,00	-	4,94
Fe ₂ O ₃	2,10	1,71	4,78	7,09	-	3,15
CaO	57,93	43,68	18,58	6,67	< 10 mas. %	59,80
MgO	6,17	3,92	3,68	2,26	< 4 mas. %	2,01
Na ₂ O _{eq}	5,90	15,27	5,59	3,70	< 5 mas. %	1,67
SO ₃	1,70	6,58	1,17	0,77	< 3 mas. %	3,33
TiO ₂	0,13	0,10	1,21	0,92	-	0,23
P ₂ O ₅	1,97	2,09	1,40	1,29	< 5 mas. %	0,22
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	23,43	21,01	66,54	104,30	> 70 mas. %	29,97
Gubitak žarenjem LOI (950 °C)	3,0	17,7	6,0	9,0	A: < 5 mas. % B: < 7 mas. % C: < 9 mas. %	3,6

2.2. Projektirani sastavi betonskih mješavina

Za potrebe ispitivanja zamiješano je 7 betonskih mješavina. Kod šest mješavina udio cementa zamijenjen je s 10 % i 15 % PDB-a. Usporedno s njima napravljena je i referentna mješavina M0 koja nije sadržavala PDB. Vodocementni omjer u svim je mješavinama iznosio $v/c = 0,50$.

Tablica 2. Sastav betonskih mješavina za 1 m³

Oznaka mješavine	M0	M1-10	M1-15	M2-10	M2-15	M3-10	M3-15
Udio PDB-a	0 %	10 %	15 %	10 %	15 %	10 %	15 %
cement [kg]	380	342	323	342	323	342	323
PDB [kg]	0	38	57	38	57	38	57
agregat [kg]	1823	1843	1867	1838	1860	1829	1846
aerant (% na masu cementa) = 0,05							

2.3. Metode ispitivanja

Kako bi se utvrdio utjecaj pepela na otpornost betona na smrzavanje sa solima primijenjene su dvije metode: indirektna metoda koja obuhvaća linijsku mikroskopsku analizu na očvrslom betonu i direktna metoda izlaganja betona ciklusima smrzavanja/odmrzavanja sa solima. Mikroskopskom analizom uređajem Rapid Air (prema HRN EN 480 – 11:2004) određen je sadržaj zraka, specifična površina i faktor razmaka betona u očvrslom stanju. Sadržaj zraka je također određen i u svježem betonu pri čemu je ispitivanje provedeno tlačnom metodom pomoću porometra. Na uzorcima betona koji su izlagani ciklusima smrzavanja/odmrzavanja sa

solima praćeni su gubitak mase, odnosno ljuštenje betona (prema HRN CEN/TS 12390-9) i promjene dinamičkog modula elastičnosti kroz vrijeme (prema HRN CEN/TR 15177).

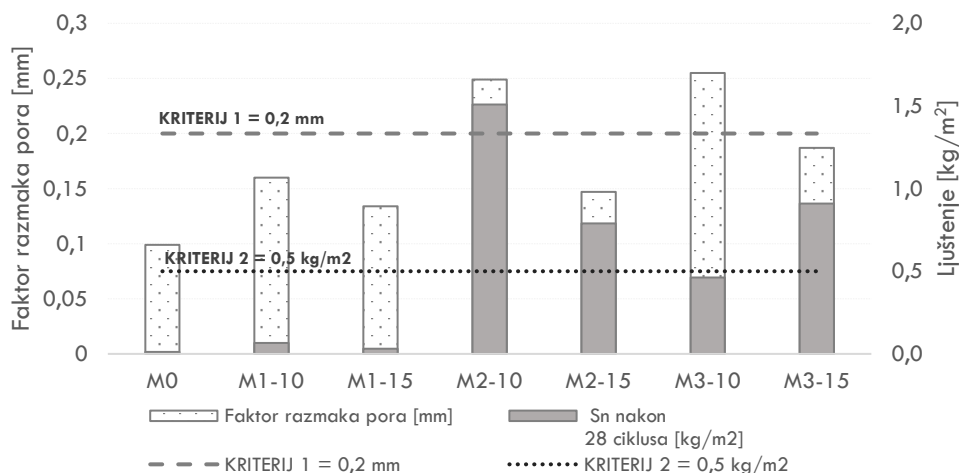
3. Rezultati i diskusija

Udio pora u svježem betonu s PDB-om znatno je manji od udjela u referentnoj mješavini bez PDB-a (Tablica 3). Najveći sadržaj zraka zabilježen je kod referentne mješavine s udjelom od 4,2 %, a najmanji kod mješavine M3-10 s udjelom od 2 %. Uspoređujući kemijski sastav PDB-a s pepelom od ugljena, generalno je utvrđen veći udio alkalija i veći gubitak žarenjem. Veliki gubitak žarenjem, kao i kod pepela od ugljena, može uzrokovati nestabilnost sadržaja zraka što nepovoljno utječe na otpornost betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja [11]. Prema [12] i [13], PDB ne smanjuje otpornost betona na smrzavanje i odmrzavanje. Međutim, prema [12] betonske mješavine koje sadrže PDB zahtijevaju veću količinu aeranta kako bi se postigla željena količina uvučenog zraka.

Tablica 3. Sadržaj zraka u svježem betonu

Mješavina	M0	M1-10	M1-15	M2-10	M2-15	M3-10	M3-15
Sadržaj zraka [%]	4,2	3,4	3,0	2,5	2,7	2,0	2,6

Uspoređene su vrijednosti faktora razmaka pora i prosječnog ljuštenja površine betona nakon 28 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja sa solima (Slika 2). Kriterij 1 odnosi se na zahtjev da faktor razmaka pora bude manji 0,20 mm, a kriterij 2 na zahtjev da srednja vrijednost ljuštenja površine bude manja od 0,5 kg/m² nakon 28 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja.



Slika 2 Usporedba otpornosti betona ispitivanjem faktora razmaka pora i ljuštenja površine

Može se uočiti da se ocjena otpornosti betona na smrzavanje i odmrzavanje temeljem mikroskopske analize nije u svim slučajevima u skladu s ocjenom danom prema ljuštenju površine. Do neslaganja je došlo kod mješavine M2 sa 15 % PDB-a i mješavine M3 s udjelom od 10 % i 15 % PDB-a. Mješavine M2-10, M2-15 i M3-15 ne zadovoljavaju uvjet $S_n \leq 0,5$ kg/m² nakon 28 ciklusa). Prema kriterijima za ocjenjivanje otpornosti betona na djelovanje ciklusa smrzavanja i odmrzavanja sa solima (Tablica 4), površinsko ljuštenje mješavina M2-10 i M3-15 također je ocijenjeno kao neprihvatljivo. Ljuštenje uzoraka ostalih mješavina može se ocijeniti kao jako dobro (M0, M1-1, M1-15) ili prihvatljivo (M2-15, M3-10). Prema tome sve mješavine, osim M2-10 i M3-

10 s najmanjim sadržajem zraka, zadovoljile su navedeni kriterij. Ljuštenje površine betonskih uzoraka praćeno je tijekom 56 dana, odnosno 56 ciklusa (Slika 3).

Tablica 4. Ocjena otpornosti betona na smrzavanje sa solima

Oznaka mješavine	M0	M1-10	M1-15	M2-10	M2-15	M3-10	M3-15
Masa oljuštenog materijala nakon 56 ciklusa [kg/m²]	0,0	0,1	0,0	1,8	0,9	0,5	1,1
Ocjena otpornosti betona na ljuštenje [14]	jako dobro			neprihvatljivo	prihvatljivo		neprihvatljivo
Faktor razmaka pora [mm]	0,1	0,16	0,13	0,25	0,15	0,26	0,19



a) M0



b) M1-15



c) M2-15



d) M3-15

Slika 3 Oljuštene površine referentnog uzorka i uzoraka s 15 % PDB-a nakon 56 ciklusa smrzavanja/odmrzavanja sa solima

Beton izložen agresivnom djelovanju okoliša razreda XF1 smatra se otpornim na smrzavanje ako pad dinamičkog modula elastičnosti nije veći od 25 % nakon 28 ciklusa, dok taj pad kod okolišnog razreda XF3 ne smije biti veći od 15 % nakon 56 ciklusa. Tablica 5 prikazuje prosječnu promjenu relativnog dinamičkog modula elastičnosti betona koji nije sadržavao PDB (M0) te betonskih mješavina s PDB-om (M1, M2, M3) tijekom izlaganja ciklusima smrzavanja i odmrzavanja sa solima.

Tablica 5. Promjena rel. dinamičkog modula elastičnosti tijekom ciklusa smrzavanja/odmrzavanja [%]

Ciklusi	M0	M1-15	M1-10	M2-15	M2-10	M3-15	M3-10
0	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
7	87 %	101 %	86 %	100 %	97 %	102 %	103 %
14	90 %	102 %	89 %	91 %	73 %	103 %	99 %
28	93 %	101 %	91 %	89 %	58 %	108 %	72 %
42	92 %	101 %	92 %	91 %	58 %	110 %	50 %
56	90 %	101 %	92 %	88 %	55 %	106 %	18 %

Iz prikazanih rezultata vidljiv je pad relativnog dinamičkog modula elastičnosti kod mješavina M2-10 i M3-10 veći od 25 % nakon 28 ciklusa odnosno 15 % nakon 56 ciklusa. Prema tome, betonska mješavina M2-10 nije pokazala zadovoljavajuću otpornost na smrzavanje sa solima prema ni jednom od tri ispitana kriterija, dok je kod mješavine M3-10 utvrđeno prihvatljivo ljuštenje površine neznatno manje od 0,5 kg/m² ali je pad relativnog dinamičkog modula elastičnosti betona veći od dopuštenih vrijednosti. Kod istih mješavina M2-10 i M3-10, s najmanjim sadržajem zraka, utvrđen je i najveći pad dinamičkog modula elastičnosti tijekom ciklusa smrzavanja/odmrzavanja. Mikroskopskom analizom je kod istih mješavina određen nezadovoljavajući faktor razmaka pora veći od 0,2 mm. Sve ostale mješavine pokazale su se kao otporne na smrzavanje sa solima s obzirom na kriterij promjene relativnog dinamičkog modula elastičnosti betona.

4. Zaključak

Značajna razlika u količini pora u svježem betonu vrlo vjerojatno je prouzročena većom vrijednošću gubitka žarenjem (LOI) PDB-a što utječe na stabilnost sadržaja zraka. Uzorci s PDB-om kod kojih je utvrđena veća količina LOI-a pokazali su manju otpornost na smrzavanje s obzirom na sva tri kriterija. Prema tome, može se pretpostaviti da bi mješavine s PDB 1 i PDB 3 pokazale bolju otpornost na smrzavanje sa soli da su umiješane veće količine aeranta, kojima bi se postigla odgovarajuća količina pora. Mješavine s PDB 1, čiji je kemijski sastav najbližiji cementu, zadovoljile su sva tri ispitana kriterija. Uspoređujući kriterije faktora razmaka pora i srednje vrijednosti ljuštenja nakon 28 dana utvrđena su manja neslaganja u dobivenim rezultatima, pri čemu se prednost daje mjerenju oljuštenog materijala s obzirom na manji broj uzoraka koji je ispitivan mikroskopskom analizom.

Zahvala

Istraživanja prikazana u ovom radu provedena su u okviru znanstvenog projekta „Transformacija pepela iz drvene biomase u građevne kompozite s dodanom vrijednošću - TAREC2” (IP-06-2016) je financiran od strane Hrvatske zaklade za znanost.

Literatura

- [1] Europski Parlament, DIREKTIVA (EU) 2018/2001 EUROPSKOG PARLAMENTA I VIJEĆA od 11. prosinca 2018. o promicanju uporabe energije iz obnovljivih izvora (preinak), Službeni List Eur. Unije, (2018) (L 328/82-209).
- [2] European Commission, State of play on the sustainability of solid and gaseous biomass used for electricity, heating and cooling in the EU, Comm. Staff Work. Doc., (2014), doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- [3] De Brito, J., Agrela, F., eds., New trends in Eco-efficient and recycled concrete, 1st ed., Woodhead Publishing, 2018.
- [4] European Commission, A Clean Planet for all - A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy, (2018) (1–25).
- [5] Šegon, V., Šimek, T., Oradini, A., Marchetti, M., Priručnik za učinkovito korištenje biomase, Hrvatski šumarski institut, 2014.
- [6] The European Commission's Knowledge Center for Bioeconomy, Brief on biomass for energy in the European Union, (2016) (1–8), doi:10.2760/546943.
- [7] Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L.K., Vassileva, C.G., An overview of the composition and application of biomass ash, Fuel, 105, (2012) (19–39), doi:10.1016/j.fuel.2012.10.001.
- [8] Direktiva Europskog Parlamenta, DIREKTIVA (EU) 2018/851 EUROPSKOG PARLAMENTA I VIJEĆA od 30. svibnja 2018. o izmjeni Direktive 2008/98/EZ o otpadu, Službeni List Eur. Unije, (2018) (L 150/109-140).
- [9] Europski Parlament, DIREKTIVA (EU) 2018/850 EUROPSKOG PARLAMENTA I VIJEĆA od 30. svibnja 2018. o od 30. svibnja 2018. o izmjeni Direktive 1999/31/EZ o odlagalištima otpada, Službeni List Eur. Unije, (2018) (L 150/100-108).
- [10] Hrvatski zavod za norme, Leteći pepeo za beton -- 1. dio: Definicije, specifikacije i kriteriji sukladnost (HRN EN 450-1:2013), 2013.
- [11] Wang, S., Llamazos, E., Baxter, L., Fonseca, F., Durability of biomass fly ash concrete: Freezing and thawing and rapid chloride permeability tests, Fuel, 87, (2008) (359–364), doi:10.1016/j.fuel.2007.05.027.
- [12] Cheah, C.B., Ramli, M., The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: An overview, Resour. Conserv. Recycl., 55, (2011) (669–685), doi:10.1016/j.resconrec.2011.02.002.
- [13] Chowdhury, S., Mishra, M., Suganya, O., The incorporation of wood waste ash as a partial cement replacement material for making structural grade concrete: An overview, Ain Shams Eng. J., 6, (2015) (429–437), doi:10.1016/j.asej.2014.11.005.
- [14] Kosior-Kazberuk, M., Surface scaling resistance of concrete with fly ash from co-combustion of coal and biomass, Procedia Eng., 57, (2013) (605–613), doi:10.1016/j.proeng.2013.04.077.

FIZIČKI MODEL ZA ISPITIVANJE PONAŠANJA KONSTRUKCIJA ZA SANACIJU KLIZIŠTA

PHYSICAL MODEL FOR TESTING THE BEHAVIOR OF LANDSLIDE REMEDIATION CONSTRUCTIONS

Sara Pajalić¹, Vedran Jagodnik¹, Željko Arbanas¹

(1) Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, spajalic@uniri.hr, vedran.jagodnik@gradri.uniri.hr, zeljko.arbanas@gradri.uniri.hr

Sažetak

U ovom radu dan je pregled provedbe četverogodišnjeg projekta financiranog od strane Hrvatske zaklade za znanost koji je u listopadu 2018. godine započeo na Građevinskom fakultetu u Rijeci. Iako je fizičko modeliranje klizišta na temelju umanjenih modela započelo još 1980-ih godina, postojeća istraživanja vezana za ponašanje konstrukcija za sanaciju klizišta u fizičkim modelima su vrlo rijetka. Modeli klizišta mogu se podijeliti u dvije grupe s obzirom na osnovne pokretače klizišta: oborine i potresi. Projekt predviđa ispitivanje ponašanja različitih konstrukcija za sanaciju klizišta u fizičkim modelima - u statičkim uvjetima izazvanim oborinama te u dinamičkim uvjetima izazvanim potresima. Gibanje klizišta promatrat će se s kompleksnom mrežom senzora za mjerenje pomaka, sila i pornih pritisaka te inovativnom fotogrametrijskom opremom. Planira se ugradnja različitih sanacijskih konstrukcija u fizički model – kao što su potporni zidovi, pilotske stijene, zamjena materijala i drenažni sustavi. Svi izmjereni podaci usporedit će se s 3D numeričkim simulacijama modela. Rezultati fizičkog i numeričkog modeliranja pružit će bolji uvid u ponašanje konstrukcija za sanaciju klizišta te bi mogli predstavljati osnovu novih pristupa projektiranju u inženjerskoj praksi.

Ključne riječi: klizišta, fizički model, oborine, potresi, sanacijske konstrukcije

Abstract

This paper reviews the implementation of a four-year research project funded by the Croatian Science Foundation, which began in October 2018 at the Faculty of Civil Engineering University of Rijeka. Although small scale physical modelling of landslides began as early as 1980s, existing studies on the behavior of landslide remediation constructions are very rare. Landslide models can be divided into two main groups in regards to the main landslide triggering factors: rainfall and earthquakes. Project encompasses testing of behavior of different landslide remediation constructions in physical models – under static conditions caused by rainfall and dynamic conditions caused by earthquakes. Landslide movement will be observed with a complex sensor network measuring displacements, forces and pore pressures, and innovative photogrammetric equipment. Different remediation constructions are planned to be built in the physical model – retaining walls, pile walls, buttressing and drainage systems. All measured data will be compared with 3D numerical simulations of a model. The results of the physical and numerical modelling will provide much better insight into the behavior of landslide remediation constructions and could present the basis for new design approaches in engineering practice.

Keywords: landslides, physical model, rainfall, earthquakes, remediation constructions

2.1. Model u statičkim uvjetima

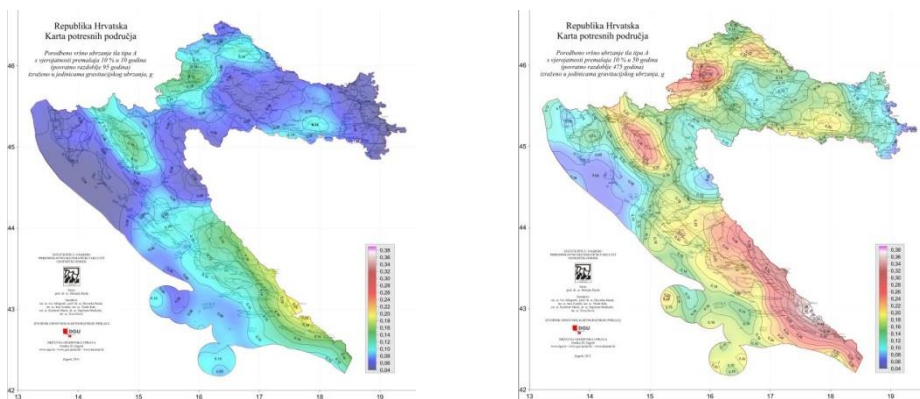
Fizički model umanjenog klizišta pod statičkim djelovanjem gdje su oborine glavni pokretač klizanja, projektiran je da se omogući pokretanje klizišta uzrokovanog kontroliranom umjetnom oborinom. Pritom je u model ugrađena odgovarajuća fotogrametrijska oprema i složena mreža senzora kako bi se omogućilo mjerenje pomaka, pornih pritisaka i pritisaka tla unutar klizišta kao što je prikazano na Slici 1a.

Značajan problem pri simulaciji klizanja uzrokovanog infiltracijom oborina predstavlja potpuna kontrola intenziteta umjetnih oborina. Iako je moguće koristiti već razvijeni uređaj za simulaciju oborina [4], [5]; odlučeno je da će simulator oborina projektirati članovi projektnog tima od elemenata uobičajeno korištenih za zalijevanje biljaka. Simulator će imati mogućnost kontroliranja intenziteta, protoka, jednolikosti vlaženja i vremena simulacije oborina, a sastojat će se od sustava prskalice s različitim vrstama mlaznica. Položaj, visina i broj mlaznica bit će promjenjivi ovisno o potrebnom intenzitetu oborina i vrsti materijala tla koje se ispituje. Sustav će kontrolirati mjeraci protoka kako bi se omogućile jednolike oborine u cijelom modelu. Glavni cilj konstruiranja simulatora oborina umjesto kupnje gotovog sustava je razvitak simulatora oborina specifično prilagođenog intenzitetu oborina karakterističnom za oborinske događaje u Hrvatskoj. Prije upotrebe, simulator oborina će biti testiran i kalibriran na različite režime kako bi se omogućila prikladna simulacija stvarnih oborina na model.

2.2. Model u dinamičkim uvjetima

Fizički model umanjenog klizišta pod dinamičkim djelovanjem gdje su potresi glavni pokretač klizanja, projektiran je s ciljem kontroliranja moguće pojave klizišta uzrokovanog povijesnim potresom iz baze podataka kao što je prikazano na Slici 1b, ili da se omogući pokretanje klizišta pri djelovanju umjetnog potresa.

Iako je u Hrvatskoj broj klizišta uzrokovanih potresima relativno mali, prema kartama potresnih područja Hrvatske (Slika 2a i 2b), pojedini dijelovi Hrvatske, poput okolice grada Rijeke ili Dubrovnika, u područjima su visoke seizmičnosti te posljedično u budućnosti može doći do pojave klizišta uzrokovanih djelovanjem potresa. Najznačajnije klizište u Hrvatskoj uzrokovano potresom je klizište Grohovo uzrokovano riječkim potresom 1750. godine s epicentrom u neposrednoj blizini grada Rijeke [6].



Slika 2. Karta potresnih područja RH – a) povratno razdoblje 95 godina; b) povratno razdoblje 475 godina [7]

Većina postojećih modelskih istraživanja koristi potresne platforme koje omogućavaju izazivanje vibracija odgovarajućih seizmogramima prirodnih ili umjetnih potresa. Osnovni cilj je utvrditi ponašanje kosine pri seizmičkom djelovanju i proučavanje sloma materijala kosine [8].

U ovom modelu seizmički impulsi bit će izazvani parom dvoosnih potresnih platformi Quanser STI-III koje se inače koriste za ispitivanje objekata pod djelovanjem cikličkog opterećenja. Dinamički model limitiran je karakteristikama potresnih platformi, tj. maksimalnom težinom ispitivanog objekta (130 kg) i maksimalnim dimenzijama objekta, te će biti manji od statičkog modela. Hod dvaju platformi bit će kalibriran za zajedničko djelovanje u smjeru nagiba kosine modela.

3. Materijali klizišta

Planira se provesti ispitivanje tri glavna modela klizišta u statičkim i seizmičkim uvjetima, sa i bez konstrukcija za sanaciju klizišta. Prvi, osnovni, model bit će najjednostavniji, dok će složenost modela rasti kroz faze provedbe istraživanja. U osnovnom modelu će se koristiti pjeskovito tlo zbog relativno jednostavnog ponašanja procesa infiltracije i mogućnosti postizanja sloma kosine. Proces skaliranja bit će određen, testiran i definiran tijekom uspostave ovog modela. Njegova osnovna svrha bit će ispitivanje funkcionalnosti projektirane platforme modela, ugrađene opreme i planiranih postupaka ispitivanja. U sljedećim fazama projekta, složeniji materijali tla će biti ugrađeni u model; od prašinstih do glinoviti tala, kod kojih će utjecaj vode u kosini i efekta konstrukcije za sanaciju biti složeniji, kako za ispitivanje tako i za samo skaliranje modela. Takvi materijali će pokazivati povećanje posmične čvrstoće u nesaturiranim uvjetima, dok će infiltracijom vode u kosinu doći do pada posmične čvrstoće zbog redukcije u sukaciji i porasta pornih pritisaka sve do sloma kosine. Materijali korišteni za modele klizišta će biti lokalni materijali uzeti s recentnih ili značajnih klizišta u Hrvatskoj [9].

4. Mjerna oprema

Odabir tehnika mjerenja i mjerne opreme u fizičkom modelu slijedi praksu sustava monitoringa na stvarnim klizištima. Prema tome, sustav senzora dijeli se na geodetski i geotehnički sustav monitoringa [10].

Geodetski monitoring temelji se na suvremenim fotogrametrijskim tehnikama za više-vremensku analizu klizišta [11] iz niza stereo slika dobivenih parom high speed kamera [12]. Kao dodatni alati koristit će se infracrvena kamera i terestrički laserski skener. Termalna analiza (IRT) omogućit će određivanje zone u kosini gdje je zbog klizanja došlo do promjene vlažnosti, temperature i napreznja, a upravo su to zone smicanja i povećanja napreznja koje će ukazivati na položaj granice klizanja [13].

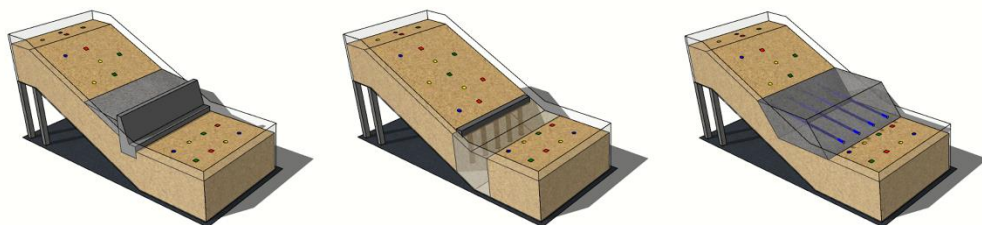
Baš poput senzora na realnim klizištima [14], geotehnički monitoring provest će se kompleksnom mrežom minijaturnih senzora poput mjernih traka za mjerenje pomaka, tenziometara za mjerenje sukacije, mjerača pornih pritisaka, akcelerometara i simulatora oborina za mjerenja intenziteta oborina. Svi senzori u modelu bit će kontinuirano povezani na data logere za kontinuirano sakupljanje i praćenje podataka. Popis mjerne opreme koja se planira koristiti u statičkom i/ili dinamičkom modelu nalazi se u Tablici 1.

Tablica 1. Popis mjerne opreme u statičkom i dinamičkom modelu

Oznaka opreme	Statički model	Dinamički model
1	Tenziometri	Tenziometri
2	Mjerači pornog pritiska	Mjerači pornog pritiska
3	Mjerne trake	Mjerne trake
4	Akcelerometri	Akcelerometri
5	Simulator oborina	Simulator oborina
6	High speed kamere	High speed kamere
7	TLS	Dvoosne potresne platforme
8	Infracrvena kamera	-

5. Konstrukcije za sanaciju klizišta

Projektom je previđena ugradnja različitih tipova konstrukcija za sanaciju klizišta koje će biti izrađene korištenjem 3D printera. Upotrebom odgovarajućih materijala za 3D printere dobit će se precizno skalirani materijalni parametri realnih elemenata konstrukcija. Složenost sanacijskih konstrukcija rast će s fazama projekta, kao i upotreba materijala: započet će se s jednostavnim potpornim zidom te prijeći na složenije konstrukcije poput pilotske stijene i sustava bušenih drenova sa zamjenom materijala u nožici klizišta (Slika 3). Fizički modeli sa sanacijskim konstrukcijama ispitat će se pod djelovanjem istih statičkih i dinamičkih uvjeta koji su izazvali slom kosine prije sanacije.



Slika 3. Fizički model sa konstrukcijama za sanaciju – a) potporni zid; b) pilotska stijena; c) sustav bušenih drenova sa zamjenom materijala

6. Zaključak

Klizišta predstavljaju jedan od najvećih geohazarda prisutan diljem svijeta te danas postoje mnoge direktive koje nastoje osvijestiti i educirati čovječanstvo o rizicima od klizišta kao i smanjiti posljedice i štete od klizišta.

Kao jedan od načina analize potrebe za smanjenjem hazarda i rizika od klizanja, nameće se fizičko modeliranje klizišta i sanacija klizišta. Iako postoje brojna istraživanja vezana za fizičke modele, izostaju detaljnija istraživanja vezana za fizičke modele ponašanja sanacijskih konstrukcija. Projekt predviđa korištenje inovativne fotogrametrijske opreme i složene mreže senzora kojima bi se istraživali fizički modeli bez i sa mjerama sanacije. Svi podaci dobiveni mjernom opremom iz fizičkog modela bit će uneseni u numeričke simulacije istog modela i analizirani, te će se na taj način provesti postupak validacije svih rezultata.

Interpretacija i spajanje rezultata numeričkog i fizičkog modeliranja pružit će jasniji uvid u ponašanje konstrukcija za sanaciju klizišta i njihovu interakciju s tlom. Rezultati istraživanja bit će osnova za racionalnije projektiranje sanacijskih konstrukcija u modernoj inženjerskoj praksi.

Zahvala

Prikazano istraživanje financira Hrvatska zaklada za znanost u okviru Projekta IP-2018-01-1503 Fizičko modeliranje ponašanja konstrukcija za sanaciju klizišta u uvjetima statičkih i seizmičkih djelovanja (ModLandRemSS).

Literatura

- [1] Petley, D.: Global patterns of loss of life from landslides, *Geology*, vol. 40 (10), 2012, 927-930, 10.1130/G33217.1
- [2] Bernat, S., Mihalić Arbanas, S., Krkač, M.: Landslides triggered in the continental part of Croatia by extreme precipitation in 2013, *Proceedings of the XII IAEG Congress, Engineering Geology for Society and Territory – Volume 2*, Lollino, G. et al., Torino, Springer, Cham, 1599-1603, 2015, 10.1007/978-3-319-09057-3_284
- [3] Wang, G., Sassa, K.: Factors affecting rainfall-induced flowslides in laboratory flume tests, *Geotechnique*, vol. 51(7), 2001, 587-599, 10.1680/geot.2001.51.7.587
- [4] Iserloh, T., Fister, W., Seeger, M., Willger, H., Ries, J. B.: A small portable rainfall simulator for reproducible experiments on soil erosion, *Soil and Tillage Research*, vol. 124, 2012, 131-137, 10.1016/j.still.2012.05.016
- [5] Lora, M., Camporese, M., Saladin, P.: Design and performance of a nozzle-type rainfall simulator for landslide triggering experiments, *Catena*, vol. 140, 2016, 77-89, 10.1016/j.catena.2016.01.018
- [6] Arbanas, Ž., Mihalić Arbanas, S., Vivoda, M., Peranić, J., Dugonjić Jovančević, S., Jagodnik, V.: Identification, monitoring and simulation of landslides in the Rječina River Valley, Croatia, *Proceedings of the SATREP Workshop on Landslide Risk Assessment Technology*, Sassa, K., Dang, K., Hanoi, 200-213, 2014
- [7] Karte potresnih područja Republike Hrvatske, <http://seizkarta.gfz.hr/>, pristupljeno: 22.09.2019.
- [8] Wang, K., Lin, M.: Initiation and displacement of landslide induced by earthquake – a study of shaking table model slope test, *Engineering Geology*, vol. 122(1-2), 2011, 106-114, 10.1016/j.enggeo.2011.04.008
- [9] Arbanas, Ž., Mihalić Arbanas, S., Vivoda Prodan, M., Peranić, J., Sečanij, M., Bernat Gazibara, S., Krkač, M.: Preliminary investigations and numerical simulations of landslide reactivation, *Proceedings of World Landslide Forum 4, Advancing Culture of Living with Landslides - Volume 2: Advances in Landslide Science*, Mikoš, M., Tiwari, B., Yin, Y., Sassa, K., Ljubljana, Springer, Cham, 649-657, 2017, 10.1007/978-3-319-53498-5_75
- [10] Mihalić Arbanas, S., Arbanas, Ž.: Landslides – A guide to researching landslide phenomena and processes, *Handbook of Research on Advancements in Environmental Engineering*, IGI Global, 474-510, 2015, 10.4018/978-1-4666-7336-6.ch017
- [11] Zanuta, A., Baldi, P., Bitelli, G., Cardinalli, M., Carrara, A.: Qualitative and quantitative photogrammetric techniques for multi-temporal landslide analysis, *Annals of Geophysics*, vol. 49(4/5), 2006, 1067-1080
- [12] Feng, T., Mi, H., Scaioni, M., Qiao, G., Lu, P., Wang, W., Tong, X., Li, R.: Measurement of Surface Changes in a Scaled-Down Landslide Model Using High-Speed Stereo Image Sequences, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 82(7), 2016, 547-557, 10.14358/PERS.82.7.547
- [13] Frodella, W., Gigli, G., Morelli, S., Lombardi, L., Casagli, N.: Landslide Mapping and Characterization through Infrared Thermography (IRT): Suggestions for a Methodological Approach for Some Case Studies, *Remote Sensing*, vol. 9(12), 2017, 1-25, 10.3390/rs9121281
- [14] Wiczorek, G. F., Snyder, J. B.: Monitoring slope movements, *Geological Monitoring*, Geological Society of America, 245-271, 2009, 10.1130/2009.monitoring(11)

MODALNA ANALIZA VIŠEKATNE KONSTRUKCIJE

MODAL ANALYSIS OF A MULTIPLE STRUCTURE

Stanko Čolak¹, Ante Džolan¹

(1) Sveučilište u Mostaru, Građevinski fakultet,
stanko.colak@gf.sum.ba, ante.dzolan@gf.sum.ba

Sažetak

Cilj rada bio je izvršiti modalnu analizu jedne višekatne konstrukcije. Dobiveni su vlastiti oblici osciliranja konstrukcije za svih pet tonova preko postupka vektorske iteracije, te su tablično i grafički predstavljeni. Koristeći različite metode (*Time history*, *SRSS* i *CQC*) izveden je proračun pomaka. Teorijski su opisane sve tri metode i dobiveni su rezultati proračuna za svaku od njih. Grafički je prikazana usporedba pomaka za naznačene tri metode u određenom vremenskom intervalu, a zatim su komentirani dobiveni rezultati koji su kod sve tri metode približno isti. Također je izvršen i proračun modalne seizmičke analize Spektralnom teorijom. Iz ovoga se proračuna može izvesti zaključak kako se usporedbom metode *Time history* i Spektralne teorije dobro podudaraju njihovi rezultati za maksimalni modalni pomak.

Ključne riječi: modalna analiza, Time history, pomaci, Spektralna teorija.

Abstract

The aim of the work was to carry out a modal analysis of a multiple structure. Own forms of oscillation of the structure for five tones were obtained through the vector iteration process and were presented in table and graphic form. Using the different methods (*Time history*, *SRSS* and *CQC*), a calculation of the displacements was performed. Theoretically, all three methods are described and the results of the calculation for each of them are obtained. A comparison of the results, for the three methods in a given time interval, is graphically shown. Also, the results are compared which are all the same in all three methods. The modal seismic analysis of Spectral Theory was also performed. It can be concluded that by comparing the method of *Time history* and Spectral theory their results correspond to the maximum modal displacement.

Keywords: modal analysis, Time history, displacement, Spectral theory.

1. Uvod

U ovome je radu proveden postupak modalne analize za jednu petokatnu konstrukciju. Na početku, nakon uvodne točke, ukratko je teorijski opisana modalna analiza. Nakon toga je zadana geometrija konstrukcije i predstavljeni podatci potrebni za modalnu analizu konstrukcije.

U trećoj je točki opisan postupak vektorske iteracije kojim se dobivaju vlastiti oblici osciliranja konstrukcije za svih 5 tonova. Na kraju treće točke tablično i grafički prikazani su vlastiti oblici osciliranja konstrukcije.

U sljedećoj je točki izveden proračun pomaka koristeći različite metode: *Time history*, *SRSS* i *CQC*. Na početku točke teorijski su opisane naznačene metode, izveden je proračun i dobiveni su rezultati za sve tri metode. Grafički je prikazana usporedba pomaka za naznačene tri metode u određenom vremenskom intervalu, a na kraju su komentirani dobiveni rezultati.

U petoj se točki izveo proračun modalne seizmičke analize koristeći Spektralnu teoriju za prvi mod. Također su grafički prikazani rezultati za pomake u ovisnosti o vremenu. Na kraju je grafički predstavljena usporedba maksimalnog modalnog pomaka dobivenog uz pomoć metode *Time history* i Spektralne teorije.

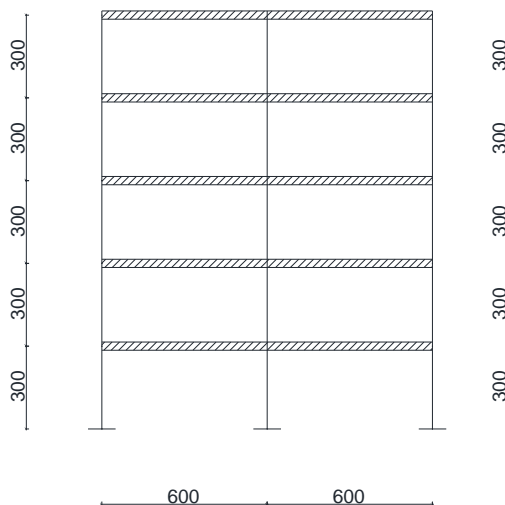
Posljednja je točka rada zaključak.

2. Geometrija i podatci o konstrukciji

Modalna analiza je dinamička analiza linearnih sustava s N stupnjeva slobode koja se zasniva na metodi razvijanja prema vlastitim oblicima ili tonovima. Ova je metoda primjenjiva ako je vremenska ovisnost sila pobude svih masa ista ili razmjerno ista što u slučaju potresnog opterećenja zadovoljava traženi uvjet. [1]

Rješenje problema svodi se na rješavanje matrične diferencijalne jednadžbe:

$$[m] \cdot \{\ddot{u}\} + [c] \cdot \{\dot{u}\} + [k] \cdot \{u\} = \{p(t)\} \quad (1)$$



Slika 1. Zadana višekatna konstrukcija

Izvršena je modalna analiza višekatne konstrukcije koja se sastoji od pet etaža. Dimenzije stupova konstrukcije su $b/h=30/30$ cm, grede su konstrukcije promatrane kao apsolutno krute u pravcu osciliranja, međukatna visina konstrukcije je 3,0 m, raspon greda je 6,0 m, a mase su

koncentrirane u razini međуетažnih konstrukcija (greda), odnosno prve su četiri mase od 6 tona, a peta je 3 tone.

Mase su numerirane od prve prema petoj etaži. Koeficijent prigušenja konstrukcije je $\xi=5\%$, a ubrzanje podloge je $a_g=0,35g$

3. Vektorska iteracija za dobivanje vlastitih oblika osciliranja

Kod modalne analize konstrukcije najprije se treba odrediti dijagram momenata savijanja od jediničnih masa svake etaže. Premnožavanjem ovih dijagrama dobivaju se članovi matrice fleksibilnosti D. Matrica masa označena je s M.

$$D = \frac{1}{EI} \begin{bmatrix} 0,75 & 0,75 & 0,75 & 0,75 & 0,75 \\ 0,75 & 1,50 & 1,50 & 1,50 & 1,50 \\ 0,75 & 1,50 & 2,25 & 2,25 & 2,25 \\ 0,75 & 1,50 & 2,25 & 2,25 & 2,25 \\ 0,75 & 1,50 & 2,25 & 2,25 & 2,25 \end{bmatrix} \quad M = m \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad m = 3 \text{ tone} \quad (2)$$

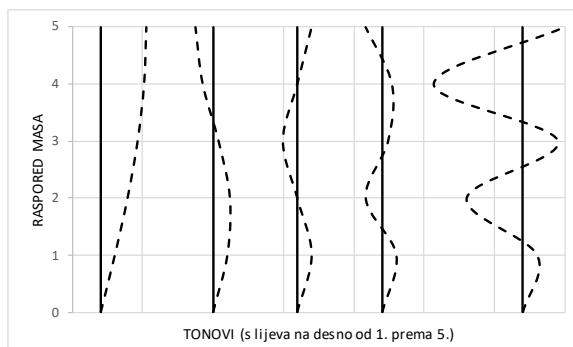
Umnoškom matrice masa i matrice fleksibilnosti dobiva se dinamička matrica masa:

$$[D_M] = D \cdot M = \frac{2,25}{EI} \cdot \begin{bmatrix} 2 & 2 & 2 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 4 & 4 & 2 \\ 2 & 4 & 6 & 6 & 3 \\ 2 & 4 & 6 & 8 & 4 \\ 2 & 4 & 6 & 8 & 5 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Nakon određivanja dinamičke matrice masa slijedi postupak vektorske iteracije kojim se dobivaju vlastiti oblici osciliranja. [2]

Tablica 1. Vlastiti oblici osciliranja

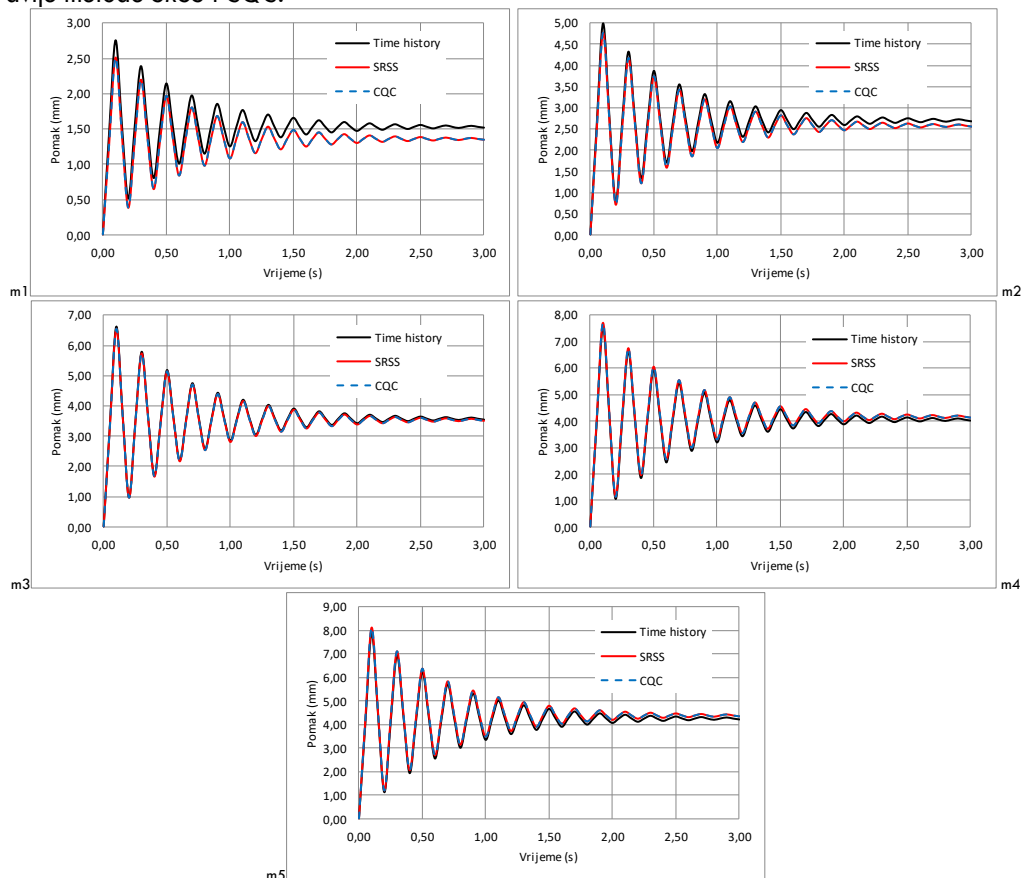
MASE	VLASTITI OBLICI				
	I. TON	II. TON	III. TON	IV. TON	V. TON
1	1	1	1	1	1
2	1,902	1,177	0	-1,185	-3,982
3	2,618	0,383	-0,996	0,41	2,479
4	3,078	-0,727	0	0,682	-6,315
5	3,236	-1,237	0,996	-1,193	2,941



Slika 2. Grafički prikaz vlastitih oblika osciliranja

4. Usporedba pomaka preko metoda *Time history*, *SRSS* i *CQC*

U ovoj su točki prikazani rezultati i usporedbe pomaka masa dobivenih preko metoda *Time history*, *SRSS* i *CQC*. Na sljedećoj se slici može vidjeti kako su dobiveni rezultati približno isti. Jedino postoji neznatna razlika u masi 1 između metode *Time history* u odnosu na preostale dvije metode *SRSS* i *CQC*.



Slika 3. Usporedba pomaka masa 1, 2, 3, 4 i 5 prema metodama *Time history*, *SRSS* i *CQC*

Metoda *Time history* predstavlja stvarne pomake određene mase na konstrukciji i ovisi o relativnom pomaku mase "i" u tonu "j" i o broju modova:

$$u_i(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_j(t) \tag{4}$$

a_{ij} - relativni pomak mase "i" u tonu "j"

n - broj modova

i - oznaka mase

j - oznaka moda

SRSS metoda je kvadratni korijen iz sume kvadrata (eng. *square root of of sum of squares*). Ovo je modalna kombinacija koja kvadrira svaku vršnu vrijednost svakoga oblika. Korijen sume kvadrata naznačenih vršnih vrijednosti daje ukupni odgovor u izrazu (5).

$$u_{i,max} = \sqrt{\sum_{j=1}^n u_{ij}^2} \quad (5)$$

$u_{i,max}$ - pomak mase "i" prema metodi SRSS u_{ij} - pomak mase "i" u tonu "j"

SRSS pretpostavlja kako su maksimalne modalne vrijednosti statistički neovisne. Kako se radi o kvadratnim vrijednostima, svaka vršna vrijednost postaje pozitivna. U slučaju konstrukcija kod kojih je veliki broj prirodnih frekvencija gotovo identičan ova pretpostavka ne vrijedi i neće dati zadovoljavajuće vrijednosti ukupnoga odgovora.

CQC metoda je kompletna kvadratna kombinacija (eng. *complete quadratic combination*). Ona predstavlja proizvod vršnih vrijednosti i -tog i n -tog oblika i korelacijskog koeficijenta ρ_m za ta dva oblika. Korelacijski koeficijent varira između vrijednosti 0 i 1 i jednak je jediničnoj vrijednosti za $i=n$.

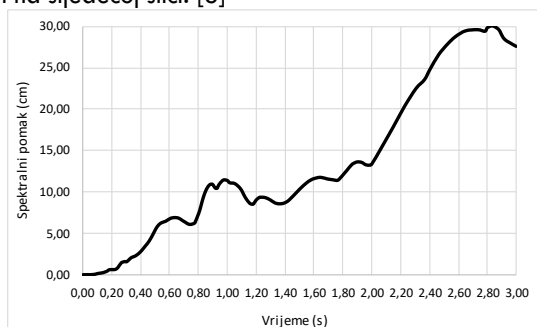
$$U_{k,max} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n u_{ki} a_{ij} u_{kj}} \quad (6)$$

$U_{k,max}$ - pomak mase "k" iprema metodi CQC

u_{ki}, u_{kj} - pomak mase "k" u "i", odnosno "j" tonu

5. Spektralna teorija za provedbu modalne seizmičke analize

Modalna seizmička analiza uz pomoć Spektralne teorije izvedena je samo za prvi mod jer su periodi osciliranja u preostalom tonovima premali. Prilikom proračuna koristio se spektar odgovora pomaka potresa 1940. El Centro $0,35 \cdot g$ s 5 % prigušenja što se može vidjeti na dijagramu prikazanom na sljedećoj slici. [3]



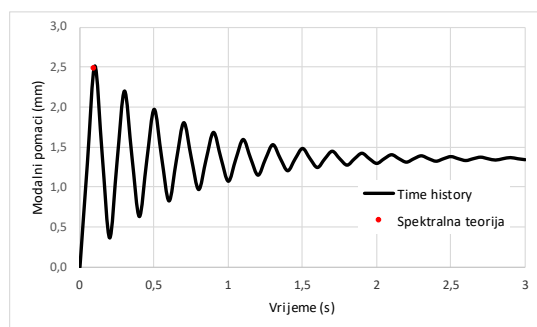
Slika 4. Dijagram spektralnog pomaka

$$T_1 = \frac{2\pi}{\omega_1} = \frac{2\pi}{31,48} = 0,2 \text{ s} \quad (7)$$

Za period osciliranja $T = 0,2 \text{ s}$ dobije se spektralni pomak koji iznosi 0,634 cm.

$$\ddot{x}_1 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_1 \cdot \dot{x}_1 + \omega_1^2 \cdot x_1 = 0,39 \cdot a_g \rightarrow \bar{x}_1 = 0,39 \cdot 0,634 \quad (8)$$

$$\bar{x}_1 = 0,247 \text{ cm} = 2,47 \text{ mm}$$



Slika 5. Usporedba metode *Time history* i Spektralne teorije

Na prethodnoj se slici može vidjeti prilično dobro podudaranje maksimalnoga modalnog pomaka kada se usporede metoda *Time history* i Spektralna teorija.

6. Zaključak

Dobiveni rezultati modalne analize za promatrane višekatne konstrukcije u potpunosti su u skladu s očekivanjima. Može se vidjeti kako je kod vlastitih oblika osciliranja konstrukcije za prvi ton pomak svakoga dijela u istom smjeru, a zatim se s povećanjem svakoga tona povećava broj promjena smjera osciliranja. Kod petoga tona osciliranja može se vidjeti kako svaka sljedeća masa mijenja smjer osciliranja. Nakon proračuna pomaka prema metodama *Time history*, *SRSS* i *CQC* vidi se kako su dobiveni rezultati kod sve tri metode približno isti, a samo postoji neznatna razlika u masi 1 između metode *Time history* i preostale dvije metode. Na kraju rada izveden je proračun modalne seizmičke analize Spektralnom teorijom. Iz ovoga se proračuna može izvesti zaključak kako se usporedbom metode *Time history* i Spektralne teorije dobro podudaraju njihovi rezultati za maksimalni modalni pomak.

Literatura

- [1] Kalman, T., Sigmund, V.: Superpozicija modalnih odgovora spektralne analize, Tehnički vjesnik, vol. 14, 2007., (17 – 24), ISSN 1330-3651, UDC/UDK 624.042.7 : 543.42
- [2] Džolan, A.: Skripta sa zadacima iz kolegija Dinamika konstrukcija i potresno inženjerstvo, Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru, 2018.
- [3] Au, S.: Operational Modal Analysis, Modeling, Bayesian Inference, Uncertainty Laws, Center for Engineering Dynamics and Institute for Risk and Uncertainty, University of Liverpool, UK, 2017., ISBN 978-981-10-4117-4, DOI 10.1007/978-981-10-4118-1

UTJECAJ NEKIH PARAMETARA NA PONAŠANJE I GRANIČNU NOSIVOST VIŠEDIJELNIH KAMENIH STUPOVA PRI STATIČKOM OPTEREĆENJU I POTRESU

THE EFFECT OF SOME PARAMETERS ON BEHAVIOUR AND BEARING CAPACITY OF MULTI-DRUM STONE COLUMNS UNDER STATIC LOAD AND EARTHQUAKE

Ante Buzov¹, Jure Radnić¹, Nikola Grgić¹

(1) Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, ante.buzov@gradst.hr, jure.radnic@gradst.hr, nikola.grgic@gradst.hr

Sažetak

Istražen je utjecaj nekoliko važnih parametara na ponašanje i nosivost višedijelnih kamenih stupova izloženih statičkim opterećenjima i potresu. Istraživanja su provedena eksperimentalno na umanjnim modelima stupova, uz korištenje suvremene opreme za ispitivanja i mjerenja. Cilj istraživanja je doprinos razvoju znanosti u predmetnom području, koji je ostvaren objavom pet znanstvenih radova u relevantnim svjetskim časopisima. Svrha istraživanja je donošenje zaključaka u pogledu istraženih utjecaja razmatranih važnih parametara višedijelnog kamenog stupa, koji bi trebali naći svoju primjenu u obnovi/ojačanju postojećih i izradi novih višedijelnih kamenih stupova u praksi.

Ključne riječi: eksperiment, višedijelni kameni stup, visina bloka, tip sljubnice, parametri trnova

Abstract

The effect of several important parameters on the behaviour and bearing capacity of multi-drum stone columns loaded by static loads and earthquakes was investigated. The experiments were conducted on small-scale column models using modern equipment for testing and measuring. The aim of this research was to contribute to the development of science in the subject area, which has been accomplished through the publication of five scientific papers in relevant worldwide journals. The purpose of this research is to provide conclusions regarding the investigated effects of important multi-drum stone column parameters, and the results should find practical application in the restoration/strengthening of existing multi-drum stone columns and the creation of new multi-drum stone columns.

Keywords: experiment, multi-drum stone column, block height, joint type, bolts parameters

1. Uvod

Brojne povijesne kamene građevine imaju neprocjenjivu kulturološku i graditeljsku vrijednost, a mnoge od njih su zaštićena spomenička i graditeljska baština. Najupečatljiviji i najdojmljiviji elementi kamenih građevina su redovito kameni stupovi.

Kao svojevrsni simboli, samostalni ili na vrhu povezani kameni stupovi potiču još iz pred-povijesnog razdoblja čovječanstva. Stupovi u povijesnim kamenim građevinama su njihovi važni, ne samo konstrukcijski već često i oblikovni elementi. Karakterizacija pojedinih stilova u povijesti graditeljstva vrlo se jasno očituje u oblikovanju stupova.

Kao konstrukcijski element u povijesnim kamenim građevinama, stupovi su manje prisutni kao jedini nosivi elementi, a više u kombinaciji sa zidovima. Stupovi mogu biti samostojeći (konzolni) ili su međusobno povezani gredama i lukovima (svodovima).

Po konstrukcijskoj važnosti u kamenoj građevini, stupovi mogu biti sekundarni ili izuzetno važni i jedini nosivi elementi.

Stupovi mogu biti manjih dimenzija, kada su često izrađeni iz jednog komada, ili većih dimenzija kada su najčešće izrađeni iz više blokova po visini (engl. multi-drum columns).

Višedijelni kameni stupovi su složene kompozitne konstrukcije, kao specifični oblik zidanih konstrukcija. Formirani su od kamenih blokova različitih svojstava, međusobno spojenih u sljubnicama na različite načine. Naime, sljubnice mogu biti suhe ili ispunjene kamenim brašnom, različitim mortovima i sl. Mogući trnovi u sljubnicama čine konstrukciju višedijelnog stupa još složenijom. Višedijelni kameni stup je složeni sklop različitih materijala, pri čemu način njegove izrade ima veliki utjecaj na njegovo ponašanje i graničnu nosivost pod opterećenjem.

Na ponašanje i graničnu nosivost višedijelnih kamenih stupova utječu mnogi važni parametri, kao što su:

- Geometrija, vitkost i rubni uvjeti stupa
- Rješenja vrha (kapitela) i dna stupa
- Geometrija, svojstva materijala i preciznost izrade kamenih blokova, te preciznost obrade spojnih ploha blokova u sljubnicama
- Vrsta i svojstva materijala u sljubnicama između kamenih blokova
- Brojni parametri eventualnih trnova u sljubnicama
- Vrsti opterećenja (statičko, dinamičko, udar) i njihovim karakteristikama
- Interakciji s ostalim nosivim elementima konstrukcije (zidovi, grede, svodovi, temelji i sl.) i itd.

Istraživanja vezana za ponašanje i nosivost kamenih stupova pod opterećenjem su još uvijek vrlo rijetka. Najveći broj istraživača su s područja Grčke i Italije, te manjim dijelom s Mediterana.

Kako su predmet istraživanja u okviru ove disertacije višedijelni kameni stupovi, u nastavku su prikazana neka poznatija i važnija istraživanja vezana za takve stupove.

Atalić i dr. [1] u istraživanju temeljenom na nizu numeričkih modela i laboratorijskim ispitivanjima ispitivali su utjecaj kontaktnih naprezanja na tradicijski kameni stup, Minafo i dr. [2] u analitičko-numeričkoj studiji analizirali su ponašanje višedijelnih stupova pri dinamičkoj pobudi sinusnog tipa. Pulatsu i dr. [3] istraživali su nelinearno ponašanje antičkih višedijelnih kamenih stupova u Mediteranskom području. Sorace i dr. [4] analizirali su seizmički odgovor slobodnostojećeg mramornog stupa. Papalou [5] je istraživala dinamički odgovor kratkih slobodnostojećih klasičnih stupova. Drosos i Anastasopoulos [6] proučavali su model slobodnostojećeg višedijelnog mramornog stupa u umanjenom mjerilu. Mouzakis i dr. [7] prikazali su rezultate eksperimentalne studije modela mramornog klasičnog stupa. Krstevska i dr. [8] istraživali su u mjerilu 1:1 prototip i model Antonina stupa.

U navedenim istraživanjima autori su numerički i eksperimentalno istraživali ponašanje višedijelnih kamenih stupova pod različitim opterećenjima, ali nisu sustavno istraživali efekte nekih parametara koji imaju značajan utjecaj na njihovo ponašanje i nosivost.

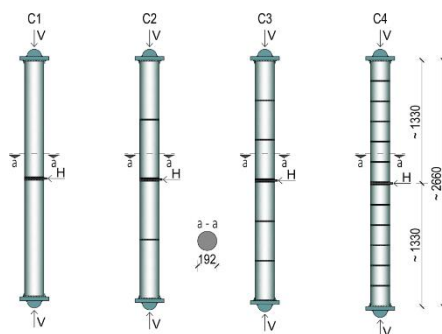
U nastavku će biti prikazan utjecaj niže navedenih parametara na ponašanje i graničnu nosivost višedijelnih kamenih stupova pri statičkom opterećenju i potresu, u vidu kratkog pregleda objavljenih radova [9-13] gdje su istraživani:

- Utjecaj visine blokova (broja sljubnica)
- Tip sljubnice
- Nekoliko parametara trnova u sljubnicama (materijal, promjer i dužina trna, promjer rupe za trn)

2. Utjecaj veličine bloka na ponašanje i nosivost višedijelnog kamenog stupa [9, 10]

2.1. Prikaz ispitivanja pri djelovanju statičke sile [9]

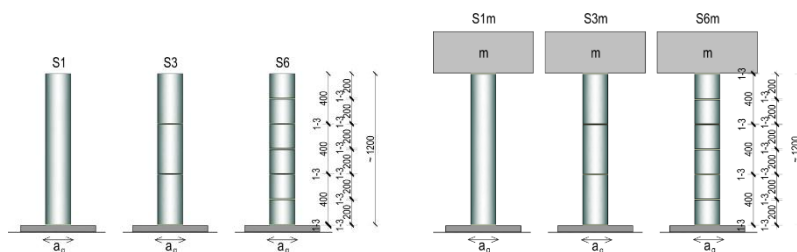
Testirani su stupovi praktično jednake visine, s različitom visinom jednakih blokova po visini stupa (Slika 1). Razmatrani su stupovi s dva (C1), četiri (C2), šest (C3) i dvanaest (C4) blokova po visini stupa. Usvojene su sljubnice s tankim slojem kamenog brašna između blokova.



Slika 1. Geometrija testiranih stupova

2.2. Prikaz ispitivanja pri djelovanju potresnog opterećenja [10]

Testirani su stupovi, približno jednake visine, sastavljeni od 1, 3 i 6 blokova po visini (Slika 2). Odvojeno su razmatrani stupovi opterećeni samo vlastitom težinom (S1, S3, S6) i odvojeno opterećeni vlastitom težinom i masom $m = 500$ kg na vrhu (S1m, S3m, S6m). Korištene su sljubnice sa kamenim brašnom. Ovi su stupovi analogni onima na Slici 1, samo su dvostruko manje visine i samostojeci. Stupovi su izloženi djelovanju triju akceleroograma: umjetni akceleroگرام (AA), akceleroگرام Petrovac (AP) i akceleroگرام Ston (AS). Mjereni su pomak i ubrzanje svih ispitivanih stupova.



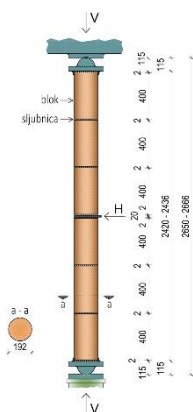
- a) Stupovi opterećeni samo vlastitom težinom b) Stupovi opterećeni vlastitom težinom i masom na vrhu
težinom masom na vrhu

Slika 2. Testirani samostojeći stupovi

3. Utjecaj tipa sljubnice na ponašanje i nosivost višedijelnih kamenih stupova [11, 12]

3.1. Prikaz ispitivanja pri djelovanju statičke sile [11]

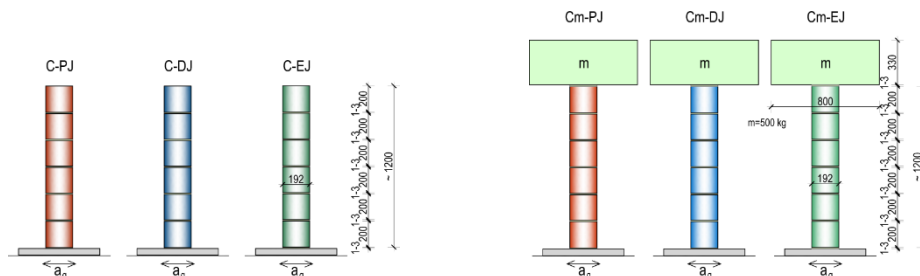
Testirani stupovi su prikazani na Slici 3 i analogni su onima u točki 2.1. Pri tome je usvojen stup sa šest blokova po visini i sa četiri tipa sljubnica: suha sljubnica (C-DJ), sljubnica s kamenim brašnom (C-SPJ), sljubnica s olovnom pločom (C-PBJ) i epoksidna sljubnica (C-EPJ).



Slika 3. Geometrija testiranog stupa

3.2. Prikaz ispitivanja pri djelovanju potresnog opterećenja [12]

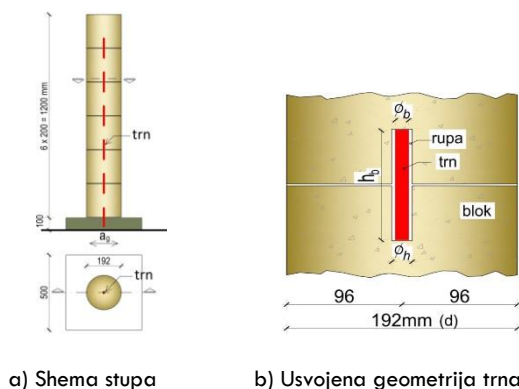
Testirani slobodnostojeći višedijelni stupovi u umanjenom mjerilu (Slika 4) su analogni onima u točki 2.2. Formirani su iz šest jednakih blokova, s tri tipa sljubnica. Stupovi C-PJ, C-DJ i C-EJ su opterećeni samo vlastitom težinom, sa sljubnicama iz kamenog pijeska (C-PJ), suhom sljubnicom (C-DJ) i epoksidnom sljubnicom (C-EJ). Stupovi Cm-PJ, Cm-DJ i Cm-EJ su u svemu jednaki stupovima C-PJ, C-DJ i C-EJ, samo što imaju dodatnu masu $m = 500$ kg na vrhu. Svi stupovi su praktično jednake visine jer su debljine sljubnica približno $1 - 3$ mm.



Slika 4. Geometrija ispitivanih stupova

4. Utjecaj nekih parametara trnova na nosivost višedijelnih kamenih stupova pri potresu [13]

Istraživan je utjecaj materijala trna, duljine trna, promjera trna i promjera rupe za trn. Testiran je samostojeći višedijelni stup prikazan na Slici 5. Stup je formiran od 6 jednakih blokova po visini, sa suhim sljubnicama između blokova. Izložen je horizontalnom ubrzanju umjetnog akcelerograma (AA) i akcelerograma Ston (AS). Varirana su gradiva trna (drvo, olovo, guma, aluminij, nehrđajući čelik), promjer trna, dužina trna i promjer rupe za trn.



Slika 5. Ispitivani stup

Utjecaj dužine trna (h_b) na nosivost višedijelnog stupa ispitivan je na trnovima iz olova i nehrđajućeg čelika ($\phi_b = 12$ mm, $\phi_h = 14$ mm). Razmatrani su trnovi dužine $h_b = 72$ mm (kratki trn), $h_b = 120$ mm (srednje dugi trn) i $h_b = 168$ mm (dugi trn), s odnosom $h_b/\phi_b = 6, 10$ i 14 . Utjecaj promjera trna (ϕ_b) ispitivan je također na trnovima iz olova i nehrđajućeg čelika sa $\phi_b = 12$ mm i $\phi_b = 20$ mm, odnosno sa $\phi_b/d = 1/16$ i $1/9.6$. Utjecaj promjera rupe za trn također je ispitivan na trnovima iz olova i nehrđajućeg čelika, sa $\phi_b = 12$ mm i $\phi_b = 120$ mm. Varirani promjeri rupe su $\phi_h = 14$ mm i $\phi_h = 22$ mm, sa $\phi_h/\phi_b = 1.17$ i 1.83 .

5. Zaključak

S povećanjem broja blokova (sljubnica) u višedijelnom stupu, smanjuje se njegova krutost i povećava njegova deformabilnost. Posljedica toga je značajno smanjenje njegove nosivosti za statička opterećenja, kao i za potrese dužeg trajanja koji unose veliku energiju u konstrukciju. Za potrese kratkog udarnog djelovanja, povećanje broja blokova u stupu može rezultirati njegovom većom nosivosti jer se smanjenjem krutosti stupa u njemu generiraju manje potresne sile. Meke sljubnice, u odnosu na krute sljubnice i stup iz jednog bloka, također rezultiraju mekšim stupom i njegovom značajno manjom nosivosti za statička opterećenja i potrese dugog trajanja s većom generiranom energijom. Međutim, za potrese kratkog udarnog djelovanja, stup s mekom sljubnicom može imati veću nosivost nego stup s krutim sljubnicama ili iz jednog bloka po visini. Trnovi u sljubnicama višedijelnog kamenog stupa značajno doprinose njegovoj nosivosti pri potresu.

Kako su zbog forme ovog rada provedena istraživanja [9-13] prikazana samo informativno, uz kratak prikaz svakog pojedinog rada i zaključaka, detaljnije informacije dostupne su u objavljenim radovima.

Literatura

- [1] Atalić, J., Uroš, M., Šavor, M.: Utjecaj kontaktnih naprezanja na tradicijski kameni stup, *GRAĐEVINAR*, 64, 2012, 891-903.
- [2] Minafo, G., Amato, G., Stella, L.: Rocking Behaviour of Multi-Block Columns Subjected to Pulse-Type Ground Motion Accelerations, *The Open Construction & Building Tehnology Juornal*, 12, 2018, 150-157, DOI: 10.2174/1874836801610010150
- [3] Pulatsu, B., Sarhosis, V., Bretas, EM., Nikitas, N., Lourenco, PB.: Non-linear static behaviour of ancient free-standing stone columns, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings*, 170, 2017, 406-418, <https://doi.org/10.1680/jstbu.16.00071>
- [4] Sorace, S., Terenzi, G., Bitossi, C., Mori, E.: Modelling of rocking and sliding effects in the seismic analysis of free-standing column, *Latin American Journal of Solids and Structures*, 14, 2017, 1804-1815, <http://dx.doi.org/10.1590/1679-78253541>
- [5] Papalou, A.: Examining the dynamic response of classical columns, *International Journal of Civil Engineering*, 16, 2018, 123-135, <https://doi.org/10.1007/s40999-016-0110-6>
- [6] Drosos, VA., Anastasopoulos, I.: Shaking table testing of multi-drum columns and portals, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 43, 2014, 1703-1723, <https://doi.org/10.1002/eqe.2418>
- [7] Mouzakis, HP., Psycharis, IN., Papastamatiou, DY., Carydis, PG., Papantonopoulos, C., Zambas, C.: Experimental investigation of the earthquake response of a model of a marble classical column, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31, 2002, 1681-1698, <https://doi.org/10.1002/eqe.184>
- [8] Krstevska, L., Mihailov, V., Boschi, E., Rovelli, A.: Experimental dynamic testing of prototype and model of the Antonina column in Roma, *Proceedings of the 11th WCEE*, Paper No. 546, Acapulco, Mexico, 1996.
- [9] Buzov, A., Radnić, J., Grgić, N., Baloević, G.: Effect of the drum height on the bearing capacity of composite multi-drum column under static load, *Composites Part B*, 148, 2018, 243-251, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.05.005>
- [10] Buzov, A., Radnić, J., Grgić, N., Baloević, G.: Effect of the Drum Height on the Seismic Behaviour of a Free-Standing Multidrum Column, *Advances in Materials Science and Engineering*, Volume 2018, 12 pages, <https://doi.org/10.1155/2018/5729068>
- [11] Buzov, A., Radnić, J., Grgić, N., Baloević, G.: Effect of the joint type on the bearing capacity of a multi-drum column under static load, *International Journal of Architectural Heritage*, 12, 2017, 137-152, <https://doi.org/10.1080/15583058.2017.1396380>
- [12] Buzov, A., Radnić, J., Grgić, N., Baloević, G.: Effect of the Drum Height on the Seismic Behaviour of a Free-Standing Multidrum Column, *Advances in Materials Science and Engineering*, 1, 2018, 1-12, doi: 10.1155/2018/5729068
- [13] Buzov, A., Radnić, J., Grgić, N.: Effects of several bolt parameters on the bearing capacity of a composite multi-drum stone column under an earthquake, *Composites Part B*, 162, 2019, 250-258, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.10.104>

PROGRAM POSTAVLJANJA MJERNIH UREĐAJA NA MOSTU GRABOVINA

PROGRAM OF MEASURING DEVICES PLACEMENT ON BRIDGE GRABOVINA

Marino Jurišić¹, Ante Džolan²

(1) Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru, marino.jurisc@gf.sum.ba

(2) Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru, ante.dzolan@gf.sum.ba

Sažetak

Ovaj rad obuhvaća cijeli program postavljanja mjernih traka i uređaja na most Grabovina. Mjerne trake za dilataciju postavljaju se na armaturni čelik i beton u dva presjeka. U planu je praćenje četiri mjerne trake po presjeku, i to po dvije trake za čelik u zategnutoj zoni te jedna traka za čelik i jedna za beton u pritisnutoj zoni. Trake za čelik su stavljene u zategnutu i pritisnutu zonu zbog istih svojstva čelika u tlaku i vlaku. Trake za beton su stavljene u pritisnutu zonu jer se smatra da se pri pojavi pukotina traka može oštetiti ili pokazati manja naprezanja zbog smanjenja naprezanja u betonu nakon formiranja pukotine. Prikazat će se postupak zaštite mjernih traka kao i način postavljanja. Rezultati bi trebali poslužiti za bolje razumijevanje puzanja i skupljanja betona.

Ključne riječi: mjerne trake, mjerni uređaji, dilatacije, puzanje betona, skupljanje betona

Abstract

This paper covers the whole program of placement of measuring gauges and devices on the bridge Grabovina. The strain gauges are placed on the reinforcing steel and the concrete in two sections. The plan is to monitor four measuring gauges along the cross-section, two steel gauges in a tension zone, one steel gauge and one concrete gauge in the compression zone. Steel gauges are placed in the tensile and compressed zone due to the similar properties of steel in pressure and tension. Concrete gauges are placed in the compressed zone because it is considered that the cracks can damage the gauge or the gauges can show less stress due to the reduction of stress in the concrete after the formation of the cracks. The procedure for protecting the measuring gauges as well as the method of installation will be displayed. The results should provide better understanding of creep and shrinkage of the concrete.

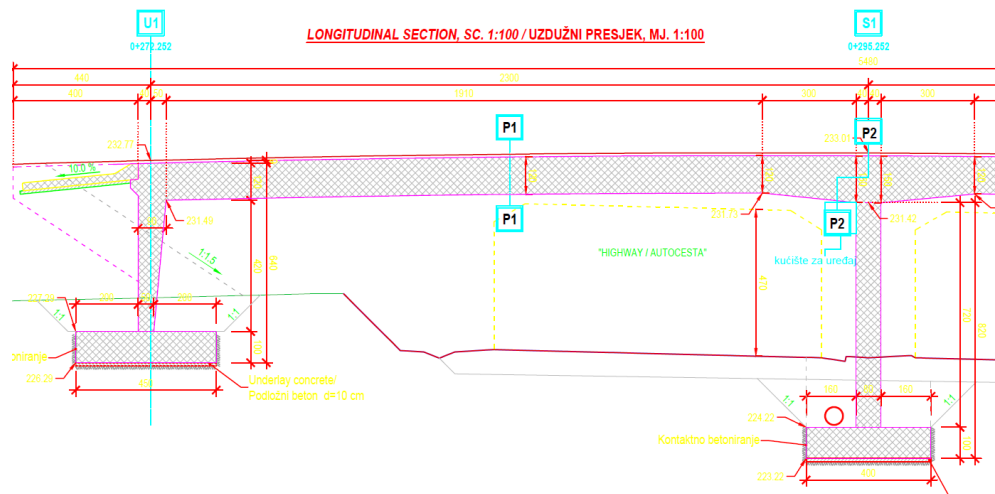
Keywords: strain gauges, measuring devices, strains, creep, shrinkage

1. Uvod

Poddionica 2 LOT-a 6, tj. dionice Mostar Jug – Počitelj, obuhvaća dio trase autoceste od početka u km 13+000,00 do stacionaže km 18+830,00. Na ovom potezu nalazi se i nadvožnjak Grabovina. Rasponska konstrukcija je monolitna AB ploča izvedena na licu mjesta, debljine 1.20 m sa zadebljanjima kod stupa na 1.50 m. Ploča je kruto povezana sa srednjim stupom i sa upornjacima. Stup je dimenzija 0.80 m x 4.40 m. Upornjaci imaju prednje zidove debljine 0.90 m na vrhu i 0.50 m na dnu (kako bi se smanjila krutost upornjaka). Integriranje konstrukcije je moguće bez velikih posljedica u vidu prisilnih deformacija (temperatura, slijeganje) zbog malih raspona konstrukcije. Most ima dva raspona po 23 m. Integralna konstrukcija izbjegava troškove održavanja i zamjene ležajeva i dilatacijskih naprava [1].

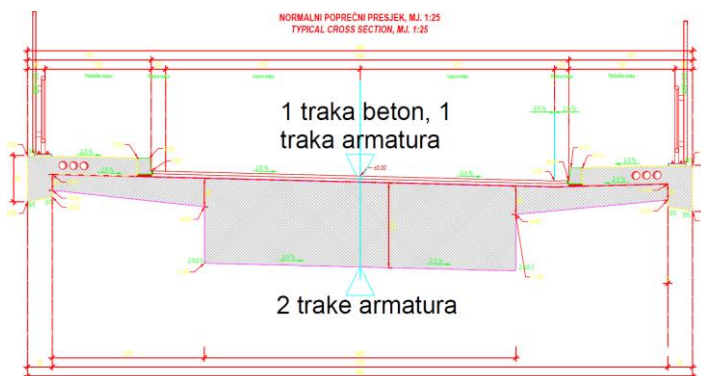
2. Plan monitoringa

Zamišljeno je da se most prati u razdoblju od jedne do jedne i pol godine, ovisno o mogućnostima. Koristit će se oprema njemačke tvrtke za praćenje i ispitivanje HBM. Koriste se mjerne trake za čelik dužine 1 cm i otpora 120 Ohma i mjerne trake za beton dužine 5 i 10 cm i otpora 120 Ohma [2]. Mjerne trake rade na principu promjene otpora, nakon što se traka izduži ili skupi zbog zatezanja ili pritiska promijeni joj se električni otpor što se na mjernom pojačalu registrira, a preko softvera interpretira kao promjena dilatacije. Pratit će se dva presjeka, jedan u polju i jedan neposredno pored oslonca (stupa), kao što je vidljivo na slici 1. U presjeku u polju pratit će se dvije mjerne trake za čelik u donjem dijelu presjeka (zatezanje) te jedna mjerna traka za čelik i jedna mjerna traka za beton u gornjem dijelu presjeka (pritisak) kao što je prikazano na slici 2. U presjeku neposredno pored stupa pratit će se dvije mjerne trake za čelik u gornjem dijelu presjeka (zatezanje) te jedna mjerna traka za čelik i jedna mjerna traka za beton u donjem dijelu (pritisak) kao što je prikazano na slici 3. Mjerne trake za beton se neće lijepiti na zategnuti dio konstrukcije jer je konstrukcija armirano-betonska pa se trake mogu oštetiti kada dođe do nastanka pukotina. Osim toga, pri formiranju pukotina oslobađa se zadržana energija zatezanja u betonu i naprezanje vlakna u vlačnom rubu betona se umanjuje. Planira se postaviti mjerno pojačalo koje će se smjestiti u kutiju neposredno pored stupa mosta. Iz njega će se kablovima spojiti na sve mjerne trake u oba presjeka jer udaljenost nije velika (maksimalno 12 m). Mjerna pojačala moraju biti konstantno napajana električnom energijom i trebaju imati zaštitu od pada napona. Planira se spremanje mjerenih podataka na USB drive ili vanjski disk. Mjerne trake za čelik se postavljaju prije betoniranja, a nakon završetka oplata i armature. Ovu fazu je bitno dobro osmisliti jer nakon betoniranja neće biti moguće napraviti korekcije. Iz ovoga razloga razvijen je sustav kojim se sve mjerne trake izvode na dno rasponske konstrukcije odakle se mogu nastavkom povezati na uređaj. Čak i mjerne trake koje će nakon betoniranja doći na gornji rub presjeka se provode kroz presjek na dno presjeka gdje će se kablovima nastaviti do mjernog pojačala. Mjerno pojačalo ima karticu za svake četiri mjerne trake, proširivo do 4 kartice. U presjek na sredini polja planira se i postavljanje akcelometra koji mjeri ubrzanje u jednom smjeru kako bi se očitali i dinamički odgovori konstrukcije. Iz tog razloga uređaj treba imati dvije kartice za mjerne trake za dilatacije i jednu karticu za akcelometar. Planira se korištenje jednog mjernog pojačala za cijeli most. Ovako postavljene trake i uređaj mogu se iskoristiti i za ispitivanje mosta probnim opterećenjem nakon završetka [3].



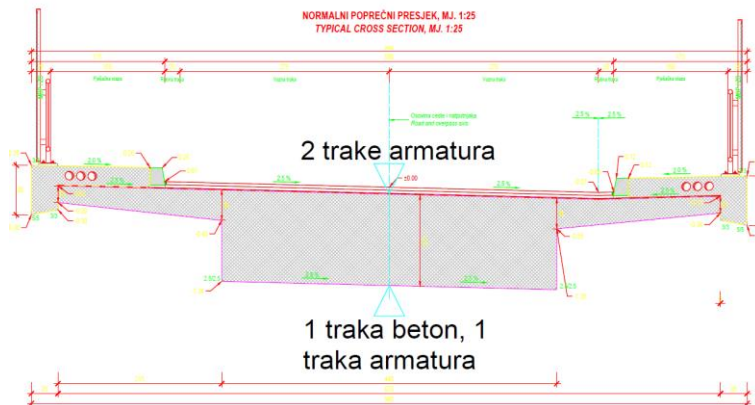
Slika 1. Presjeci za mjerenja na mostu

POLJE P1



Slika 2. Mjerne trake za presjek u polju

OSLONAC P2



Slika 3. Mjerne trake za presjek nad osloncem

3. Priprema mjernih traka

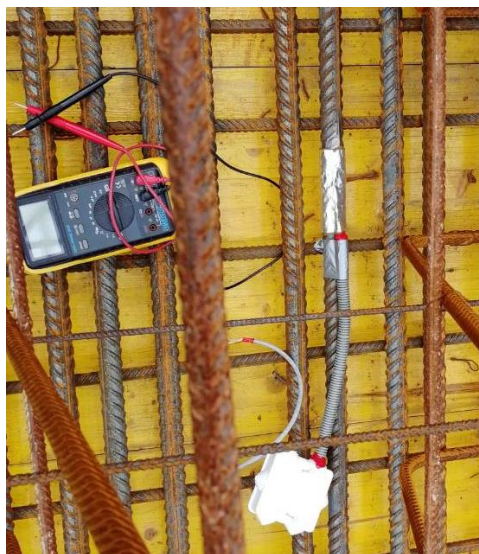
Za postavljanje mjernih traka važna je priprema. Mjerne trake će ostati na konstrukciji duži period vremena i ukoliko želimo dobre rezultate moramo paziti na postavljanje i zaštitu mjernih traka. U ovoj fazi postavljeno je 20 traka za čelik, dok su ostavljena mjesta za lijepljenje traka za beton. Nakon razmišljanja, istraživanja i savjetovanja odlučeno je da se mjerne trake za čelik pripreme na sljedeći način: mjerne trake su zalemljene na mjerne kablove određene dužine, primjerice mjerne trake koje se nalaze bliže gornjem rubu presjeka zalemljene su na kablove dužine cca 2-2.5 m. Mjerne trake koje se nalaze bliže donjem rubu zalemljene su na kablove dužine 0.7-1 m. Razlog tomu je što će se betonirati tek nakon postavljanja mjernih traka za čelik. Trebalo je naći način da nakon betoniranja i očvršćavanja betona kablovi mjernih traka budu pristupačni za povezivanje sa mjernim pojačalom. Odlučeno je da se višak mjernog kabla smota u malu električnu kutiju koja će se zakovati na dno oplate, pri tome ostavljajući donju stranu otvorenu. Na ovaj način pri betoniranju beton neće ući u električnu kutiju, a pri skidanju oplate iz kutije bi se trebao jednostavno izvući mjerni kabal. Drugi vid zaštite je polaganje mjernog kabla u što tanje plastične bužire kako ne bi došlo do oštećenja kabla pri betoniranju ili deformacijama. Spoj između bužira i električne kutije osiguran je izolacijskom trakom, kao i kraj gdje izlazi mjerna traka. Mjerne trake su pripremljene prije izlaska na teren da bi se uštedilo na vremenu pri postavljanju. Osim toga, dosta je lakše pripremiti trake u radnom prostoru sa alatom nego unutar niskog armaturnog koša (slika 4).



Slika 4. Pripremljene mjerne trake na mostu

4. Postavljanje mjernih traka

Nakon završene pripreme može se pristupiti postavljanju mjernih traka. Jako je bitno da površina na koju se mjerne trake postavljaju bude glatka i očišćena. U ovom slučaju trake se lijepe na armaturni čelik koji je rebrast (B500). Prije lijepljenja brusilicom su obrušeni dijelovi šipki gdje će se staviti mjerne trake. Nema nikakve opasnosti od oštećenja armature jer se brusi samo površinski sloj i to samo na površini dovoljnoj za mjernu traku od 1 cm. Postupak ugradnje svake mjerne trake je isti, jedina razlika je što se bužiri mjernih traka koji se lijepe na gornju zonu armature učvršćavaju uz vilice da bi se osigurali pri betoniranju. Postupak je sljedeći: prethodno izbrušeno mjesto se očisti vatom natopljenom alkoholom. Nakon toga traka i kutija se stave u položaj za lijepljenje kako bi se provjerilo da nema smetnji. Bužir i traka se privremeno fiksiraju trakom za izolaciju, najčešće za armaturu kao što je vidljivo na slici 5a. Zatim se na mjesto gdje će se traka zalijepiti ili na samu traku nanese jednokomponentno trenutno ljepilo. Traka se čistim prozirnim listićem pritisne na armaturnu šipku i uroni u ljepilo, te se ovako zadrži dok ljepilo ne počne vezati. Nakon što ljepilo u potpunosti veže možemo skloniti pomoćni listić i traku zaštititi fleksibilnim komadom ljepljive mase sa aluminijskim licem. Ova masa bi trebala obuhvatiti armaturnu šipku i početak trake do bužira (slika 5b). Nakon postavljanja teško ju je ukloniti i pruža adekvatnu zaštitu. Nakon toga, a prije nego se električna kutija zakuje za oplatu, provjeri se otpor u mjernoj traci. Ukoliko je otpor veličine koju je proizvođač naznačio traka nije oštećena. Poslije provjere otpora bužir se može fiksirati izolirnom trakom na još nekoliko mjesta i električna kutija se može zakucati čavlima za oplatu. Čavle je dovoljno zakucati tek toliko da uđu u oplatu da se onemogući prodiranje cementnog mlijeka u kutiju. Ovim načinom se izbjegava prekomjerno oštećenje oplata kao i eventualna opasnost od čavala pri skidanju oplata (slika 6). Korištena su dva čavla po kutiji. Nakon postavljanja svih mjernih traka za čelik ostavljena su tri kabla u polju koja sa gornjeg ruba ploče vode kabal do kutije na dnu. Oni će poslužiti za kasnije spajanje mjernih traka za beton u polju. Bužiri su izvedeni na vrh mosta iznad gornjeg ruba ploče i označeni da se ne bi oštetili ili zabetonirali.



Slika 5. a) privremeno fiksirana mjerna traka za čelik, b) zaštićena mjerna traka



Slika 6. Vidljive kutije nakon skidanja oplata mosta – pristupačni mjerni kablovi

5. Zaključak

Ovako pripremljene i postavljene trake trebale bi dati dobre rezultate dilatacija preko kojih će se pratiti stanje mosta u svakom trenutku. Postavljene su rezervne trake u slučaju da se neke oštete pri ugradnji ili pri betoniranju. Uređaj koji se postavi na most mora biti na mostu do završetka monitoringa i cijelo vrijeme snimati podatke. Ti podaci se mogu ručno povući na računalo i analizirati dok uređaj još radi. Usporedno sa mjerenjima planira se napraviti proračunski model u programskom paketu SOFiSTiK gdje se može modelirati realna konstrukcija. Na taj način, imat ćemo model za usporedbu sa mjerenjima s terena, te možemo donijeti bitne zaključke o ponašanju mosta i poklapanju stvarnog ponašanja mosta sa računskim modelom.

Literatura

- [1] IPISA INSTITUT d.o.o. Sarajevo: Glavni projekat autoceste na koridoru Vc, Dionica: Buna - Počitelj, 2016., 65-69
- [2] HBM: Test & Measurement | Load Cell | Transducer | Strain Gage, <https://www.hbm.com/en/>, pristupljeno: 14.08.2019.
- [3] Jurišić, M., Cvitković, M.: STUDENČICA BRIDGE TESTING, Electronic Journal of the Faculty of Civil Engineering Osijek-e-GFOS, vol. 7 N 12, 2016, 1-9, <https://doi.org/10.13167/2016.12.1>

OCJENA ENERGETSKIH KARAKTERISTIKA KOMPOZITA CLT - STAKLO

ENERGY EVALUATION OF CLT - GLASS COMPOSITE

Nikola Perković¹, Vlatka Rajčić¹

(1) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, nperkovic@grad.hr, vrajic@grad.hr

Sažetak

Nosivo staklo u kombinaciji s drvenim okvirom predstavlja novu generaciju nosivog kompozitnog sustava koji ima predispozicije za dobro ponašanje prilikom potresa, istovremeno je energetski efikasno i isplativo, estetski prihvatljivo te ima dobre nosive karakteristike. Ispitivanje i ocjenjivanje karakteristika koje definiraju energetsku učinkovitost sustava kompozitnih konstrukcija od CLT okvira i stakla jedna su od ključnih faza njezina razvoja i optimizacije. Dobiveni rezultati omogućuju nastavak razvoja kompozitnog sustava u cilju optimizacije energetske učinkovitosti i usklađivanja sa zahtjevima nacionalnih i europskih standarda.

Ključne riječi: CLT, drvo, staklo, energetska učinkovitost

Abstract

The bearing glass in combination with the wooden frame represents a new generation of structural composite system that is predisposed to be earthquake resistant, while being energy-efficient and cost-effective, aesthetically acceptable and has good bearing characteristics. The testing and determination of properties defining the energy efficiency of the composite construction system made of CLT frame and glass are one of the key phases of its development and optimization. Results received enable the continuation of composite panel development in terms of energy performance optimization and alignment with the requirements of national and European standards

Keywords: CLT, timber, glass, energy evaluation

1. Uvod

U posljednjih nekoliko desetljeća došlo je do naglog razvoja CLT-a i stakla kao nosivog materijala. U svrhu ispitivanja termičko-fizikalnih karakteristika kompozitnog sustava drva - staklo (laminirano, IZO staklo), u sklopu projekta „Vetrolignum“ izgrađen je takozvani „živi laboratorij“, u obliku jedno-prostornog objekta u prirodnoj veličini (slika 1). Tlocrtne dimenzija prostorije su 3,22x3,80m, a visina prostorije 2,8 m. Građevina je smještena na neprohodni krov Građevinskog Fakulteta sveučilišta u Zagrebu. Prethodno je kompozitni sustav analiziran s aspekta nosivosti, upotrebljivosti i stabilnosti [1], [2]. Projekt i istraživanje će nadograditi znanje vezano uz dimenzioniranje konstrukcije, novih načina povezivanja nosivih elemenata i te omogućit izradu studiju optimizacije određenih dijelova panela u svrhu što bolje energetske učinkovitosti sustava. Studije omogućuju zaključke potrebne za izradu objekta kompozitnog sustava drvo – nosivo staklo, koja bi se u konačnici mogla ugraditi u stvarnu zgradu što je i krajnji cilj projekta. Također,

ova vrsta hibridnog elementa može se koristiti kao neovisni element u izgradnji drvenih konstrukcija, privremeno ili trajno ojačanje i stabiliziranje elemenata postojećih objekata i objekata kulturne baštine, te kao element za izgradnju višenamjenskih i adaptivnih fasadnih sustava.



Slika 1. Objekt „Vetro lignum“

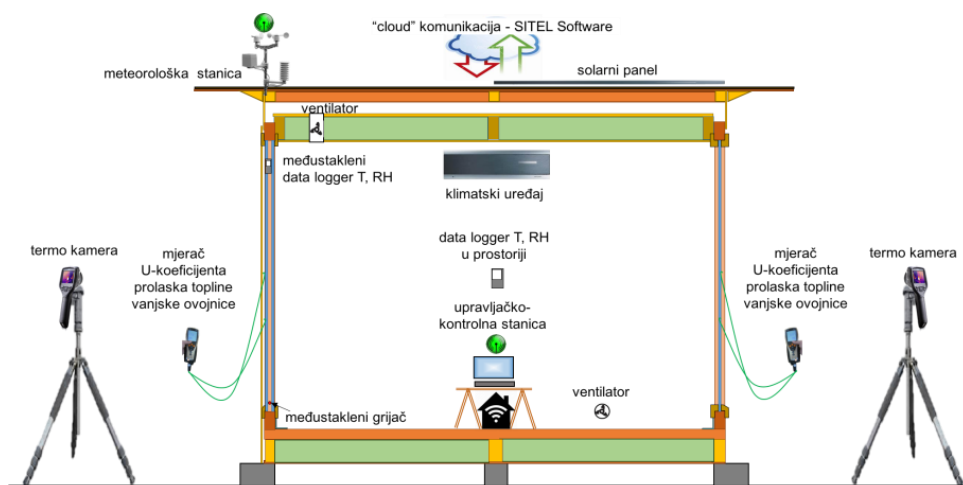
2. Energetska učinkovitost kompozitnog sustava drvo – staklo

Ispitivanje energetske karakteristike i ponašanja kompozitnog sustava drvo - staklo osnova su za uvođenje ovog inovativnog građevnog elementa u praksu, posebice kada se radi o fasadnom elementu. Fasadni element je ključni faktor koji definira energetske ocjene i razred cjelokupnog objekta. U Europi, jedna od važnijih zakonodavnih direktiva s ciljem poboljšanja energetske učinkovitosti europskih zgrada je Direktiva 2010/31/EU [3]. Uzimajući u obzir navedeno, elementi fasade moraju biti projektirani tako da zgradama pružaju potrebnu fleksibilnost u pogledu protoka energije i toplinske udobnosti.

2.1. Program ispitivanja i kontinuirani monitoring termalno – fizikalnih karakteristika

Ispitivanja će se provoditi u dva jednogodišnja ciklusa koja su u nastavku nazvana „Ciklus 1“ i „Ciklus 2“. Ciklusi se razlikuju u orijentaciji objekta i različitim vrstama staklenih panela koji se periodično mijenjaju. Ovaj rad opisuje Ciklus 1 koji se odvijao kroz sva godišnja doba u razdoblju od rujna 2018. do kolovoza 2019. Ciklus 2 je predviđen od rujna 2019. do kolovoza 2020. Ciklus 1 sadržava mjerenje relativne vlažnosti i temperature u prostoru, između dva staklena panela, kao i neka preliminarna mjerenja potrošnje energije u sustavu. Dodatno su napravljene snimke termografskom kamerom gdje se mogu uočiti toplinski mostovi i problematični detalji spajanje pojedinih elemenata. Na kraju, napravljeno je i preliminarno mjerenje vrijednosti

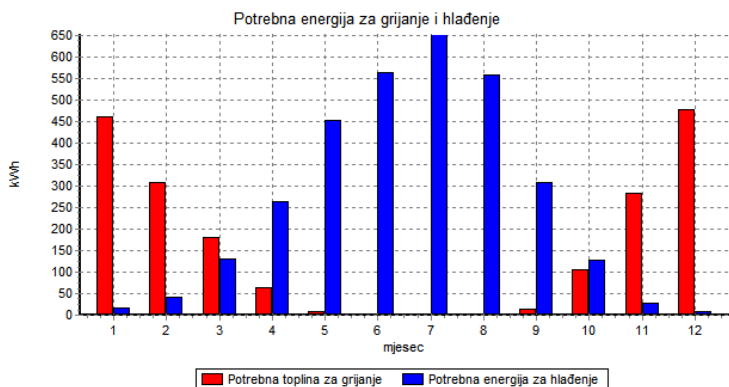
koeficijenta toplinske provodljivosti u staklenom panelu. Svrha istraživanja je dobiti uvid u ponašanje sustava u realnim uvjetima, a sve s ciljem da se postepeno prati poboljšanje i optimizacija energetske učinkovitosti sustava. Tijekom izrade kompozitnog panela između stakala ugrađeni su mjerni uređaji povezani kablovima do mjesta prikupljanja podataka. Na objekt je pričvršćena meteorološka stanica, koja mjeri klimatske parametre (brzina vjetera i smjer vjetera, količina oborina, temperatura i vlaga) te je osiguran sistem kontinuiranog praćenja klimatskih uvjeta i pribavljanja podataka preko namjensko za ovaj projekt razvijene upravljačko-kontrolne stanice (proizvod poduzeća SITEL d.o.o iz Ljubljane). Na krov objekta postavljeni su solarni paneli koji su dodatan izvor energije. Naknadno, ugrađeni su klima uređaj i ventilator koji približavaju uvjete u laboratoriju onima u realnom stanju, tj. u svakodnevnom boravku ljudi u stambenim i poslovnim objektima. Ispitivanjem količine isporučene i utrošene energije dobivaju se podaci za proračun energetske bilance zgrade. Svi mjerni uređaji mogu se vidjeti na slici 2.



Slika 2. Mjerna mjesta i mjerni uređaji

2.2. Model za simulaciju toplotnog odaziva panela

Simulacije predstavljaju jedan od najmoćnijih i najvažnijih alata u modernom svijetu. Osnovna ideja za izradu modela i simulacija je to da je jeftinije i brže napraviti virtualni model koji je zasnovan na poznatim fizičkim procesima, nego realan prototip. Također, ovo se odnosi i na testiranje potencijalno mogućih alternativnih rješenja. Osnovni cilj ovih simulacija bio je da se što točnije izračunaju toplinska opterećenja (gubici i dobici topline), kao i cjelokupna energetska analiza objekta sa aspekta procjene potrošnje svih vidova energije [4]. Model daje rezultate koji upućuju na racionalnu uporabu energije i toplinske zaštite objekta Vetrolignum. Proračun je napravljen prema zahtjevima iz Tehničkog propisa o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama "Narodne novine", broj. 128/15 [5]. Na slici 3 može se uočiti raspodjela potrebne energije za grijanje i hlađenje za stvarne meteorološke podatke. Potrebna energija za hlađenje najviše vrijednosti dostiže od travnja do rujna s vrijednostima $Q_C = 260 - 650$ kWh. Najviše vrijednosti potrebne energije za grijanje postižu se od studenog do veljače $Q_H = 300 - 460$ kWh. Godišnja potrebna energija za grijanje iznosi $Q_{H,nd} = 1.906$ kWh/a, a godišnja potrebna energija za hlađenje iznosi $Q_{c,nd} = 3.155$ kWh/a. Može se uočiti da je veća potrošnja energije za hlađenje. Visoki gubici energije uzrokovani su neizoliranim toplinskim mostovima, toplinskim mostovima zbog promjene materijala te linijskim toplinskim mostovima zbog promjene geometrije.



Slika 3. Potrebna energija za grijanje i hlađenje

3. Zaključak i smjernice za daljnje istraživanje

Rezultati u ovoj fazi ispitivanja pokazuju da su uvjeti u laboratoriju u skladu s očekivanjem. Proračunske vrijednosti potrebne energije za grijanje i hlađenje ukazuju da je potrebno obratiti pažnju na toplinske mostove i obraditi karakteristične detalje objekta u kojima je očekivano povećanje toplinskog toka. To se prvenstveno odnosi na mjesto spoja različitih građevinskih dijelova, gdje su pretpostavljeni toplinski mostovi zbog promjene geometrije i materijala. Visoki dobici energije rezultat su i toga što nije projektirano zasjenjenje velikih površina ostakljenih dijelova konstrukcije čime se povećava potreba za energijom za hlađenje. U sljedećoj fazi pristupit će se razradi detalja i dodatnih mehanizama brtvljena i rješavanja problema eventualne pojave negativnih čimbenika kao rezultat povišene vlage. Iako je bilo i kišnih razdoblja, nije se pokazala veća vlažnost u zraku između stakala, što ukazuje na uspješno djelovanje brtvi. Mjerenje unutarnje temperature i vlažnosti omogućuje kontrolu i postizanje potrebnih unutarnjih uvjeta. Na temelju analize rezultata mjerenja poboljšana su toplinska svojstva kompozitnog panela i time značajno doprinose podizanju razine njegove tehnološke spremnosti. Mjerenje unutarnje temperature i vlažnosti omogućuje kontrolu i postizanje potrebnih unutarnjih uvjeta. Na temelju analize rezultata mjerenja poboljšana su toplinska svojstva kompozitnog panela i time značajno doprinose njegovom tehnološkom razvoju. Ovi rezultati nam daju detaljniji uvid u prednosti i mane sustava, što će biti temelj za daljnje rješavanje i ispitivanje u sljedećoj fazi. Energetska učinkovitost je najbolji način za postizanje ciljeva održivog razvoja i u skladu s klimatskim promjenama.

Literatura

- [1] Antolinc, D., Uporaba staklenih panelova za potresno varno gradnju objekata. Doktorska disertacija, 2013.
- [2] Rajčić, V., Zarnić, R., Seismic response of timber frames with laminated glass infill. CIB-W18/45-15-4, Växjö, Sweden, 2012. 45: p. 11.
- [3] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/?uri=CELEX%3A32010L0031> pristupljeno: 09.07.2019
- [4] Anđelković A., Modeliranje energetske karakteristike dvostrukih ventilisanih fasada, Doktorska disertacija, Novi Sad, 2015.
- [5] HRN EN ISO 13788:2002 Značajke građevinskih dijelova i građevinskih dijelova zgrada s obzirom na toplinu i vlagu -- Temperatura unutarnje površine kojom se izbjegava kritična vlažnost površine i unutarnja kondenzacija -- Metode proračuna (ISO 13788:2001; EN ISO 13788:2001)

PRELIMINARY STUDY ON THE BEHAVIOUR OF ALUMINIUM COLUMNS IN TRANSIENT HEATING CONDITIONS

PRELIMINARNA STUDIJA PONAŠANJA ALUMINIJSKIH STUPOVA NESTACIONARNIM MODELOM ZAGRIJAVANJA

Marko Goreta¹, Neno Torić¹, Ivica Boko¹ and Jelena Lovrić-Vranković¹

(1) University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, mgoreta@gradst.hr

Abstract

This paper presents a preliminary study on the fire behaviour of aluminium columns made of structural alloy 6082 T6 in terms of transient heating. The results of numerical modelling of three transient column tests with different level of applied axial force and with constant heating rate were compared with recent experimental study [1] on the reduction of columns capacity due to creep.

Keywords: aluminium, EN 6082AW T6, columns, transient tests, creep

Sažetak

U ovom radu predstavljena je preliminarna studija o ponašanju aluminijskih stupova izloženih požaru izrađenih od strukturne aluminijske legure 6082 T6 u nestacionarnom modelu zagrijavanja. Rezultati numeričkog modeliranja provedenog na tri stupa sa različitim razinom uzdužne sile i konstantnom brzinom zagrijavanja uspoređeni su s nedavnim eksperimentalnim istraživanjem [1] o redukciji nosivosti zbog puzanja u nestacionarnom modelu zagrijavanja.

Ključne riječi: aluminij, EN 6082AW T6, stupovi, nestacionarni testovi, puzanje

1. Introduction

In the past few decades, more and more of load-bearing structures are made of aluminium alloys. Their favourable mechanical characteristics support their use in modern construction industry. Low density, ease of forming and extruding of complex shapes of cross sections and high corrosion resistance nominates aluminium as comfortable alternative for steel in standard everyday constructions. However, its fire vulnerability significantly limits its application in civil engineering practice and requires detailed research of its load bearing capacity in terms of degradation of mechanical properties and the development of high-temperature creep.

Recent studies [2-4] conducted by Universities of Split and Sheffield within the period 2015-2018 (supported by Croatian Science Foundation project no. UIP-2014-09-5711) set basis for aluminium creep testing in fire conditions with stationary tests (Fig. 1). This study, based on coupon and column tests, verified creep development and its effect on reduced capacity in fire. Since creep is load and temperature dependant feature, for temperatures under 160°C and axial load lower than 80% of columns load capacity, its effect can be neglected.

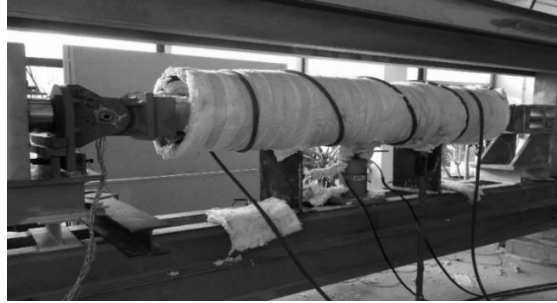


Fig 1. Column test-setup

This study represents continuation of research in terms of transient heating. Temperature load used for the preliminary tests simulates fire protected aluminium columns with heating rate up to 2.5°C with radiation heating regime based on induction heating.

Conducting transient tests is considered as better approach for simulation of fire exposed columns in real conditions than stationary tests. However, their implementation is complicated because the temperature load causes redistribution of inner forces in the column and it is necessary to track changes constantly over time. Great amount of time dependant parameters essential for the efficient transient test are the main reason of their reduced presence in scientific literature.

2. Short description of transient tests

The main feature of this preliminary transient tests is to load the columns with constant force of approximately 80% of elements capacity and expose them to thermal load until failure.

Difference between stationary and transient tests is presented on Fig. 2. It is obvious that for each stress level on the curve σ_i , the total deformation on the transient stress-strain curve can be divided into two components: stress related strain ϵ_{σ_i} and creep strain ϵ_{cr,σ_i} . In case of the classical transient test, the level of creep strain that is implicitly included in the stress-strain curve depends upon the level of stress that is kept constant during the test and the imposed heating gradient on the specimen.

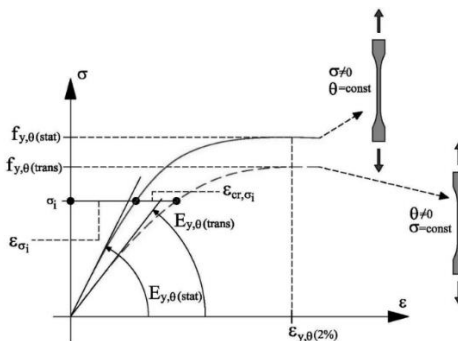


Fig 2. Difference between stationary and transient tests

Prior to this numerical model, experiments were performed in the Structures laboratory at Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split study [1] in transient conditions. Aluminium alloy EN 6082AW T6 was used since 6xxx series have a minimum proof strength of 260 MPa which is comparable to frequently used carbon steel alloys.

The testing frame was made of massive steel (UPN280) profiles connected with bolts ($\varnothing 30$) and welds to ensure sufficient rigidity during the test. Steel tube which served as a furnace for

aluminium columns was placed in the middle of the frame. Novel heating scheme based on induction heating was used to produce the magnetic field around the tube which produces rapid heating of ferromagnetic materials within its reach. The round shaped furnace served as uniform heating source of the cross section along the column by means of radiation heat transfer with heating rate of approximately 2.5°C .

Heating of the 2579 mm long aluminium columns (I profiles with flange width 220 mm and web height 170 mm) was measured by a series of thermocouples in five different sections (Fig. 3).

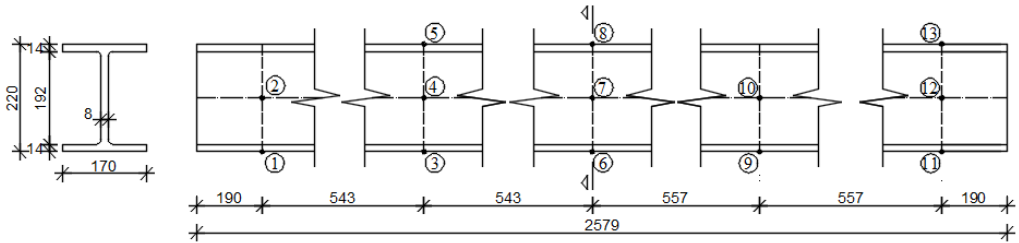


Fig 3. Geometry characteristics of the column with thermocouples

Horizontal and vertical displacements were measured with two independent linear variable differential transformers (LVDT) with high accuracy ($1/1000$ mm). Horizontal and vertical loads were applied with hydraulic rams attached to testing frame.

The tests were performed in three phases: axial and transversal loading of the column, heating of the specimen and unloading of the column with progressive cooling after failure. First phase was preliminary axial loading of the column with axial compressive force of approximately 57 kN. This preliminary axial loading was necessary to prevent unwanted vertical displacements of the column during the intake of transverse load. Full application of the both forces on the specimen concludes first phase of the test.

The transient test starts with the second phase (heating phase) with aforementioned heating rate of 2.5°C which stabilizes 1 hour into the test because of progressive heating of the steel tube.

3. Numerical and creep model

Modelling of the column behaviour at high temperature was performed using the academic version of software ANSYS Workbench R16.2 [5]. Ansys is capable of geometric and materially nonlinear analyses of structures under stationary and transient heating scenarios. It uses the Newton-Raphson method as an incremental-iterative solution process with included large deflections.

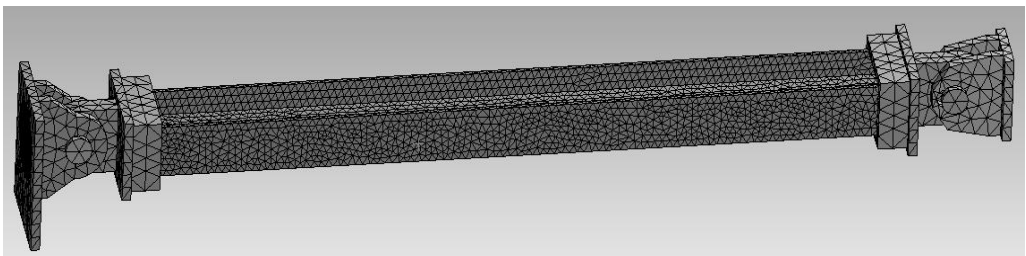


Fig 4. Numerical model and mesh size

Different mesh sizes have been tested in order to get better accuracy in the simulation. Model with mesh size of 25 mm was used for the column and 50 mm for bolts and bearings as it is shown in Fig. 4. Mesh elements automatically generated by ANSYS Triangle surface mesher were SOLID187, SHELL181, CONTA174, TARGE170, MPC184.

Since the bolts and bearings are made of steel S355, their deformation can be considered minimal.

The connections between the elements were provided with the contact option in the Static structural module of ANSYS Workbench. Bonded contacts are assigned for column and bearing connections and frictional contact was provided between the steel bearings and the bolts with friction coefficient of 0.2. The material is assumed as isotropic elastic and mechanical properties of the aluminium were taken from literature based on previous study [3].

Based on the temperature field from the experiments, temperature loads were applied with a time-dependent value to the different sections of the column. A thermal analysis was carried out separately then the temperatures were applied to nonlinear static structural model.

Norton creep model [6] available in ANSYS is chosen for modelling of the aluminium alloy. Creep strain rate by Norton is given in Eq. (1)

$$\dot{\epsilon}_{cr} = C_1 \cdot \sigma^{C_2} \cdot e^{-\frac{C_3}{T}} \tag{1}$$

Where C_1, C_2, C_3 Temperature dependent constants (Table 1)
 σ Stress
 T Absolute temperature
 $\dot{\epsilon}_{cr}$ Creep strain rate

Software MATLAB [7] is used to optimize these constants from stationary tests [2] with curve-fitting option for creep strain data in order to acquire best fits across several creep curves.

Table 1. Creep constants for specific temperature obtained by matching the study [2]

temperature (°C)	C1	C2	C3
150	2,102	0,00344	-266,7
200	4,9E+09	-0,6004	9164
250	4,3E+10	1,656	16030

Norton creep model utilizes only first two creep phases and it does not cover the tertiary creep phase (Fig. 5). In the primary phase the strain rate is relatively high but decreases with time. The strain rate decreases to a minimum and becomes near constant on the beginning of the secondary phase which is often referred as steady-state creep. In the third phase or tertiary creep, the creep rate begins to accelerate as the cross section of the specimen decreases and leads to material fracture.

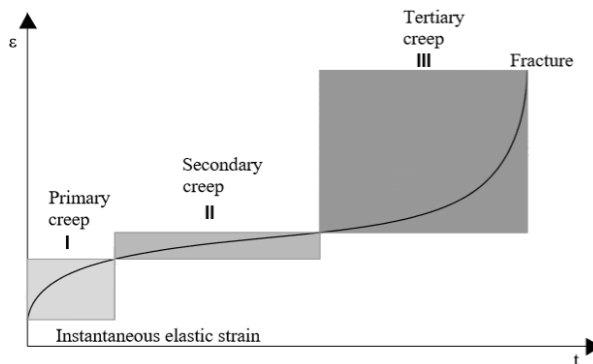


Fig 5. Creep strain in phases

4. Results and discussion

Main assumption is that the creep deformation will manifest through the vertical displacements of the column. The great divergence in numerical and experimental results is visible for total vertical displacements in Fig. 6, but it is also noticeable that the over-time displacements are following nearly the same pattern.

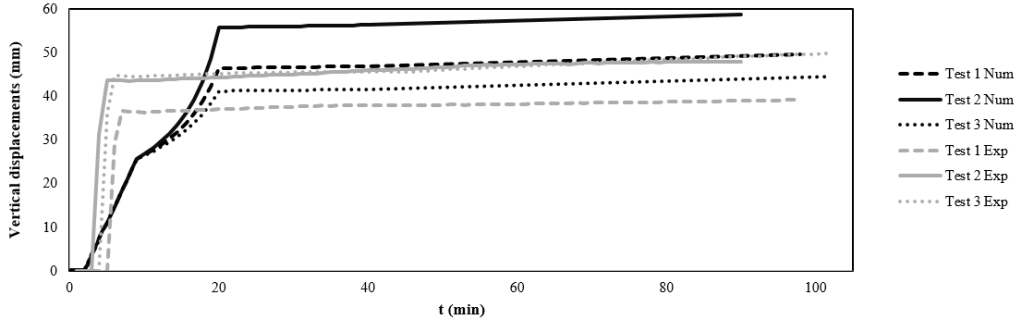


Fig 6. Comparison of numerical and experimental vertical displacements

Detailed comparison of the results is shown in table below (Table 2.). For load regimes we can see the change in failure time. For 120 kN horizontal force difference the fail of the column between tests 2 and 3 occur in time interval of 12 minutes what is about 30°C difference in temperature for 2.5°C heating rate.

Table 2. Result comparison between experimental [1] and numerical study

	vertical displacements numerical (mm)	vertical displacements experimental (mm)	failure time (min)	horizontal force (kN)	vertical force (kN)
Test 1	49,64	39,34	98	560	39
Test 2	58,81	48,12	90	615	39
Test 3	44,44	50,09	102	495	39

According to the results, we can say that this creep model have potential for further and more detailed research. The current deviations are caused because of insufficiently explored creep model for transient tests. It was noted that Norton creep temperature dependant coefficients were interpolated with curve-fitting regression option from the results of stationary tests. However, different loading regime regarding the transient heating imposes another approach in terms of creep.

5. CONCLUSION

This preliminary numerical study serves as basis for further research in this field of study since the creep effects are currently insufficiently explored and they have significant impact on columns exposed to fire.

Some guidelines for future scientific development are:

- Improve numerical model in terms of creating detailed friction model for all contact elements with dense local meshing
- Carry out detailed coupon testing on transient loaded specimens in terms of creating more accurate creep model for detailed numerical study
- Test columns for different structural and thermal load levels with increased heating rate up to 20°C

This study showed that it is necessary to approach to transient tests with great caution because of several important parameters which have great impact on the overall results in terms of column capacity during numerical simulations.

ACKNOWLEDGEMENT

This research is partially supported through project KK.01.1.1.02.0027, a project co-financed by the Croatian Government and the European Union through the European Regional Development Fund - the Competitiveness and Cohesion Operational Programme.

References

- [1] Goreta M., Torić N., Divić V., Boko I., Lovrić-Vranković J., Testing the influence of creep on fire-exposed aluminium columns, *9th International Congress of Croatian Society of Mechanics*, 18-21 September 2018, Split, Croatia, 2018
- [2] Torić N., Brnić J., Boko I., Brčić M., Burgess I. W. and Uzelac I., Experimental Analysis of the Behaviour of Aluminium Alloy EN6082 AW T6 at High Temperature, *Metals*, 7: 126, 2017, 15
- [3] Torić N., Boko I., Divić V., Burgess I., Goreta M., Experimental analysis of the influence of creep on fire-exposed steel and aluminium columns., 10th International Conference on Structures in Fire, In: Nadjai, Ali; Ali, Faris; Franssen, Jean-Marc; Vassart, Olivier, eds, , University of Ulster, Belfast, 619-624, 2018.
- [4] Torić N., Boko I., Uzelac I., Harapin A., Divić V., Galić M., Brnić J., Čanađija M., Turkalj G., Lanc D., Brčić M., Burgess I., 2017. High-temperature properties of aluminum alloy EN6082AW T6. In: Gillie, Martin; Wang, Yong, eds, Applications of Fire Engineering, Manchester, CRC Press/Balkema, p. 31-35.
- [5] Ansys, Inc. Canonsburg, PA 15317, Release 16.2, 2015
- [6] Norton F.H., The Creep of Steel at High Temperatures, McGraw-Hill Book Company, New York, 1929.
- [7] Matlab, The MathWorks R2017a, Inc., Natick, Massachusetts, United States

PREGLED POSTOJEĆEG STANJA ZNANJA U ISTRAŽIVANJU RAZVOJA ODBAČENE KAVERNE UZ RIPRAP ZAŠTITU

REVIEW OF THE EXISTING STATE OF THE ART IN DEVELOPMENT OF DEFLECTED SCOUR HOLE NEXT TO THE RIPRAP SCOUR PROTECTION

Antonija Cikojević¹, Gordon Gilja¹

(1) Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, acikojevic@grad.hr, ggilja@grad.hr

Sažetak

Podlokavanje stupova mostova je posljedica erozivnog djelovanja vode koja već dugi niz godina narušava ionako već dotrajalu infrastrukturu u Hrvatskoj i Europi. Specifičnost tih mostova je izgradnja riprap zaštite od podlokavanja čijom se izvedbom utjecaj erozije propagira nizvodno u korito na mjesto odbačene kaverne. Cilj istraživanja je razvoj nove empirijske zavisnosti za određivanje ravnotežnih karakteristika kaverne nastale podlokavanjem oko izvedene riprap zaštite. U tu svrhu ovaj rad predstavlja pregled postojećih istraživanja iz predmetnog područja na temelju kojeg će biti moguće predložiti ostvarivi smjer istraživanja i definirati hipotezu istraživanja doktorske disertacije.

Ključne riječi: podlokavanje stupova mosta, riprap zaštita, odbačena kaverna

Abstract

Bridge scour is a result of water induced erosion that affects bridges across Europe throughout history. Bridges in Croatia spanning large rivers have riprap scour protection installed, which results in downstream erosion and development of the deflected scour hole. The aim of the research presented in this paper is to develop empirical equation for determination of equilibrium characteristics of the deflected scour hole next to the riprap scour protection. The paper presents an overview of existing research in order to propose a feasible research direction and to define the hypothesis of the doctoral dissertation.

Keywords: bridge pier scouring, riprap protection, deflected scour hole

1. Uvod

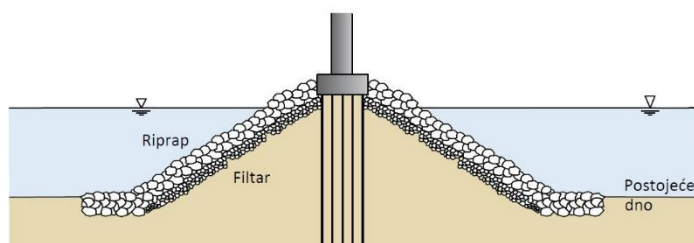
Degradacija riječnog dna dio je morfodinamičkog razvoja aluvijalnog riječnog korita, a može dodatno biti potaknuta lokalnim antropogenim djelovanjima kao što je izgradnja infrastrukturnih građevina u koritu. Izgradnjom mosta najčešće se lokalno remeti strujna slika što rezultira povećanom turbulencijom koja stvara povoljnije uvjete za pokretanje nanosa u okolici stupova. Pokretanje materijala s dna uzrokuje podlokavanje oko stupova mostova i pojavu kaverni u njihovoj neposrednoj blizini [1]. Kaverna se razvija do svog ravnotežnog stanja u skladu s režimom voda kada snaga toka i intenzitet turbulencije više nisu dostatni za pokretanje čestica s dna kaverne. Međutim, dubina kaverne nije konačna - ona će se povećati za vrijeme pojave velikog vodnog vala jer će se zbog veće dubine vode stvoriti novi uvjeti za njeno produbljanje [2]. U rijekama koje karakterizira kretanje vučenog nanosa često je izazov odrediti ravnotežnu dubinu kaverne jer se ona zapunjava vučenim nanosom nakon opadanja vodnog vala [3]. Pojava podlokavanja je neminovni proces koji se ne može izbjeći, stoga je potrebno predvidjeti njegov vremenski i prostorni razvoj kako bi se osigurala adekvatna zaštita od podlokavanja u tijeku projektiranja ili procijenila opasnost u tijeku eksploatacije mosta. Prilikom projektiranja zaštite stupova mostova često se predviđa izvedba riprapp zaštite od podlokavanja zbog cijene, jednostavnosti izvedbe, prilagodljivosti uvjetima na terenu i lakog održavanja [4]. Međutim, njegovom izvedbom podlokavanje nije u potpunosti onemogućeno, već se razvoj kaverne odvija na nizvodnoj nožici riprappa nakon čega se on počinje urušavati u novonastalu odbačenu kavernu čime može izgubiti funkciju zaštite stupa mosta. Položaj i opseg odbačenih kaverni u koritu rijeke je nepoznat i time predstavlja posrednu prijetnju stabilnosti mosta [5]. Većina mostova preko velikih rijeka u Hrvatskoj je već zaštićena riprappom [6] te je stanje riprapp zaštite kao i maksimalne opasnosti od njenog podlokavanja nepoznanica. Stoga je cilj predloženog istraživanja u sklopu izrade doktorske disertacije unaprijediti empirijske zavisnosti za određivanje vremenskog i prostornog razvoja odbačene kaverne nastale podlokavanjem oko riprapp zaštite. U ovom radu predstavljen je trenutni pregled stanja znanja iz predmetnog područja te definirana metodologija istraživanja na kojoj će se temeljiti izrada doktorske disertacije.

2. Pregled stanja znanja

Istraživanje podlokavanja oko stupova mostova seže daleko u prošlost i prate ga opsežna istraživanja, najčešće provedena u hidrauličkom kanalu i umanjenom mjerilu. *Scour at bridge waterways* jedna je od prvih knjiga u kojoj je dan pregled i usporedba empirijskih jednadžbi za izračun podlokavanja koje vrijede u različitim hidrauličkim uvjetima kao što su: Blench, Breusers, Inglis, Laursen, Neill i Shen [7]. Zatim je 1977. godine na zahtjev IAHR-a napravljen značajan doprinos objedinjavanjem stanja znanja na temu lokalnog podlokavanja oko stupova mostova [8]. Opsežnim izvješćem obuhvaćen je velik broj empirijskih jednadžbi koje su uspoređene, za njih je dan kritički osvrt te prijedlog smjera daljnjih istraživanja. Najnovija knjiga predmetnog istraživanja je *Bridge Scour* [9], koja daje sustavan pregled pristupa određivanja podlokavanja te primjere iz prakse. Glavni fokus knjige je ujednačavanje dostupnih jednadžbi radi lakše usporedivosti, naročito između starih i novih metoda za izračun podlokavanja. U knjizi je predstavljeno 30-ak studija slučaja oštećenja mostova podlokavanjem te poduzete inženjerske mjere u pojedinoj studiji.

U literaturi postoji širok raspon metoda i tehnika kojima je moguće zaštititi stup mosta od podlokavanja. U sklopu američkog programa NCHRP 2006. godine je završno jedno od najopsežnijih istraživanja zaštite stupova mostova od podlokavanja [4]. Istraživanje se sastojalo od laboratorijskih ispitivanja zaštita stupova od podlokavanja koje se najčešće koriste u praksi, a to su: horizontalno položen riprapp, ukliješteni betonski blokovi, gabionski madrac, injektirani madrac te geovreće ispunjene pijeskom. Prilikom dimenzioniranja riprapp zaštite od podlokavanja potrebno je odrediti dimenzije kamenih blokova da mogu odolijevati hidrodinamičkom opterećenju toka. Unger i Hager [10] su u svom radu predstavili 3 mehanizma urušavanja riprappa:

posmično urušavanje gdje se riprap ne može oduprijeti turbulentnim vrtlozima s prednje strane stupa, zatim urušavanje unutarnjom erozijom gdje je finiji materijal dna korita odnošen kroz šupljine riprapa i urušavanje ruba koje podrazumijeva osipanje površinskog riprapa u novonastalu kavernu. Najčešća metoda riprap zaštite od lokalnog podlokavanja koja se primjenjuje u Hrvatskoj je konusni oblik riprapa. Njime se kamenim nabačajem ne ispunjava samo kaverna, već se konstrukcija pod određenim nagibom izdiže iznad razine postojećeg dna potpuno oblažući temelj stupa (Slika 1.). Julien i dr. su kao jednu od alternativa za zaštitu stupa mosta na rijeci Nakdong predložili upravo konusni riprap, a proračunali su ga korištenjem metode posmičnih naprezanja [11].

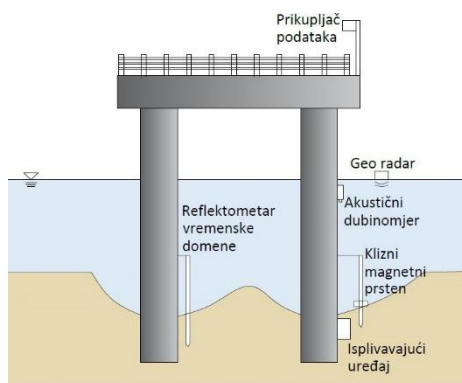


Slika 1. Konusna riprap zaštita od podlokavanja (prilagođeno iz [11])

S obzirom da ovako zaštićeni stupovi znatno sužavaju protočni profil rijeke, uspor i ubrzanje toka je izraženije u odnosu na nezaštićeni stup te posljedično dolazi do još intenzivnije erozije materijala s dna. Većina dosadašnjih istraživanja bavila su se uglavnom dimenzioniranjem veličine kamenih blokova, no time problem nije riješen već samo dislociran zbog toga što se podlokavanje nastavlja na nožici konusne riprap zaštite. U kavernu nastalu podlokavanjem nožice riprap se počinje urušavati i time on gubi svoju funkciju [1]. Dakle, za dugoročno rješavanje problema podlokavanja nije dovoljan samo odabir veličine blokova riprapa, već je potrebno definirati njegov prostorni raspored i utjecaj na širi potez korita.

Postoji niz istraživanja koja predlažu jednadžbe podlokavanja oko stupa mosta, no uočeno je da nedostaju ona koja obrađuju podlokavanje oko riprapa kojim se zaštitio stup. U tu svrhu planiraju se iskoristiti postojeća istraživanja o podlokavanju pera koja se izvode od kamenog nabačaja. S hidrauličkog aspekta radi se o sličnim procesima koji opisuju interakciju toka rijeke i riprapa. Detaljna istraživanja podlokavanja oko pera uglavnom su napravljena na fizičkim modelima jer se otežanost terenskih mjerenja očituje u njihovom izvođenju za vrijeme velikih voda. Jedno od prvih takvih laboratorijskih istraživanja načinio je Karaki 1959. godine [12]. Pera izgrađena od nasipa zahtijevaju izvedbu vanjskog sloja od riprapa kako bi se osigurala stabilnost konstrukcije pera. Karaki je istraživanjem pokazao da je za održavanje funkcionalnosti pero potrebno s obložiti riprapom od glave do polovine njegove duljine s prednje te do četvrtine sa zadnje strane kako bi se nakon formiranja kaverne riprap urušio u kavernu i time ju zaštitio od daljnjeg produblivanja. Liu [13] je proveo istraživanje s ciljem određivanja ravnotežne dubine podlokavanja u različitim geometrijskim i hidrauličkim uvjetima za pješčano korito i miran režim tečenja. Od novijih laboratorijskih ispitivanja podlokavanja pera valja spomenuti Salmija i Masjedija [14] koji su varirali veličinu riprap blokova i duljinu pera kako bi se utvrdio njihov utjecaj na stabilnost riprapa. Zaključak je da se stabilnost smanjuje povećanjem sljedećih utjecajnih parametara: duljine pera, veličine riprap blokova i Froudivog broja. Kuhnle i Alonso [15] dali su vrijedan doprinos u poimanju procesa podlokavanja koji se nastavlja nakon postignute ravnoteže u uvjetima nailaska sljedećeg vodnog vala. Trodimenzionalno polje brzina mjerili su ADV-jem i zaključili da će za nastavak podlokavanja pera na kojem kaverna već postoji presudno biti bočno strujanje, a ne prednji turbulentni vrtlozi kao što je slučaj prije nastanka kaverne.

Da bi se stekao detaljan uvid u proces razvoja odbačene kaverne planira se provesti opsežno terensko mjerenje koje bi omogućilo verifikaciju fizičkog modela umanjenog mjerila i 3D numeričkog modela u mjerilu prototipa. Kao referentno iskustvo za terenska mjerenja koristit će se američko istraživanje na rijeci Mississippi koje je obuhvaćalo 56-godišnji monitoring podlokavanja oko stupova 22 mosta [16]. U tom istraživanju predstavljena je tehnologija terenskog mjerenja i odabrana metodologija koja se koristila za obradu podataka. Terensko mjerenje razvoja odbačene kaverne može dati relevantne podatke samo ako se ono mjeri za vrijeme velikog vodnog vala kada kaverna doseže svoje maksimalne dimenzije. Mjerenje s brodicom u takvim uvjetima ubrzanog i vrtložnog toka oko stupa mosta može biti izuzetno opasno. Stoga je potrebno osmisliti alternativne tehnike bilježenja podataka pričvršćivanjem mjernih instrumenata za stup mosta ili sličnim metodama daljinskog mjerenja kako bi se osiguralo prikupljanje podataka u stvarnom vremenu za vrijeme nailaska vodnog vala. U praksi postoje brojna iskustva u mjerenju podlokavanja raznim instrumentima, npr. Gavin i Prendergast [17] su dali pregled nekih tehnologija za mjerenje podlokavanja oko stupova mostova prikazanih na slici 2.



Slika 2. Instrumenti za mjerenje podlokavanja (prilagođeno iz [17])

Za određivanje količine nanosa koji ulazi/izlazi iz kaverne koristi se georadar (engl. ground penetrating radar). Georadar se temelji na svojstvu refleksije elektromagnetskih valova na granici dviju sredina različitih električkih karakteristika. Uređaj emitira impulse koji se odbijaju od površinskog i potpovršinskog nanosa u pokretu i na taj način stvaraju sliku pokretnog korita. Nedostaci ovog pristupa je što se uređajem mora upravljati ručno i nije moguće kontinuirano praćenje. Prednosti ovakvog pristupa su visoka točnost rezultata i jednostavna montaža. Reflektometar vremenske domene (engl. time-domain reflectometry) je elektronički instrument za mjerenje dubine podlokavanja. Sonda se montira u tlo uz stup i mjeri reflektirani impuls na temelju kojeg određuje međudjelovanje vode i nanosa. Nedostatak reflektometra je vremenski i financijski zahtjevna ugradnja dugačkih sondi te utjecaj temperature vode na točnost uređaja. Akustični dubinomjer je uređaj koji se montira na stupove mosta, odmah ispod površine vode i mjeri dubinu u točki ili snopu. Uređaj je osjetljiv na zrak zahvaćen u vodi jer odašilje zvučne valove, a njegova točnost ovisi i o dubini postavljanja. Građevinski fakultet je primijenio sličnu metodu za praćenje kretanja dina pomoću višesnopnog dubinomjera [18]. Isplivavajući uređaj ugrađuje se u tlo do razine do koje se očekuje podlokavanje. Princip rada je takav da kad razina podlokavanja dođe do razine do koje je uređaj ukopan, uređaj ispliva na površinu, horizontalni položaj i šalje signal uređaju za prikupljanje podataka. Nedostaci su skupa instalacija i ograničenost na jedno mjerno mjesto, tj. jednu mjernu dubinu. Magnetni klizni prsten je gravitacijski senzor pričvršćen na štap te se pomiče prema sa promjenom dubine podlokavanja. Zapis podataka se odvija pomoću magnetnog prekidača. Senzor mora biti dovoljno velik da spriječi prodiranje u tlo dok je u stanju

mirovanja. Nedostatak uređaja je što može doći do udara predmeta (nanosa i naplavina) nošenih tokom, a potrebno je i više uređaja oko stupa jer jedan mjeri samo jednu vertikalnu po dubini.

Terenska mjerenja zahtijevaju bilježenje podataka u dužem vremenskom razdoblju kako bi se obuhvatio zadovoljavajući raspon hidroloških događaja. Često u razdoblju istraživanja neće nastupiti mjerodavni velikovodni događaj pa se može očekivati da će biti potrebno izvršiti ekstrapolaciju podataka numeričkim i/ili fizičkim modelom verificiranim na temelju terenskih mjerenja. Zaid i dr. su razvili numerički model temeljen na podacima iz prethodno provedenih eksperimenata [19]. Osnovna svrha izrade modela bila je provesti analizu karakteristika turbulentnog tečenja oko stupa mosta i procijeniti povećanje posmičnog naprezanja na dno korita oko stupa mosta. Dobiveni rezultati pokazali su dobro podudaranje s eksperimentalnim podacima iz literature. Ova studija bi se mogla upotrijebiti kao referentna za razvoj numeričkog modela za simulaciju 2D i 3D turbulentnog opstrujavanja oko stupa. Iskustva numeričkog modeliranja Hunga i Yaua koji su ispitivali osjetljivost podlokavanja oko stupova mostova u uvjetima velikih voda mogu poslužiti kao smjernica [20]. Mohammad, Noor i Gazali uspješno su proveli verifikaciju postojećih empirijskih jednadžbi (CSU, Melville i Sutherland, Jain i Fisher, Laursen i Toch) na fizičkom modelu u laboratoriju [21]. Guven i Guna su razvili hibridni matematičko-numerički model u kojem su simulirali vremenski razvoj kaverne. Verifikaciju su proveli pomoću eksperimentalnih podataka iz literature i kao rezultat su dobili dobro poklapanje modela s eksperimentalnim podacima u uvjetima izražene turbulencije [22].

3. Zaključak

U ovom radu dan je pregled stanja znanja u području istraživanja podlokavanja oko stupova mosta s fokusom na izvedenu riprap zaštitu od podlokavanja. Većina mostova na velikim hrvatskim rijekama zaštićena je riprapom, što predstavlja jedinstvene uvjete kakvi nisu do sada bili predmet sustavnog istraživanja. Predloženo istraživanje u sklopu izrade doktorske disertacije dat će doprinos području istraživanja na način da se istraži zavisnost između hidrodinamičkih uvjeta pri nailasku vodnog vala i vremenskog i prostornog razvoja odbačene kaverne na nizvodnoj nožici riprap zaštite stupa mosta. Korištena metodologija istraživanja obuhvaćat će eksperimentalno prikupljanje podataka na fizičkom modelu umanjenog mjerila u hidrauličkom kanalu i numeričke simulacije u mjerilu prototipa. Podaci prikupljeni navedenim modelima bit će objedinjeni u zajedničku prostornu i vremensku domenu kako bi se dobila obuhvatna slika o karakteristikama polja tečenja na širem području mosta. Modeli će biti kalibrirani na temelju terenskih mjerenja polja brzine i verificirani na temelju mjerenja batimetrije korita, tj. kaverni od podlokavanja. Varijacija geometrije stupa, geometrije riprapa, granulometrijskog sastava korita i hidrauličkih rubnih uvjeta bit će temeljena na karakteristikama mostova u Hrvatskoj, no proširena na način da uspostavljene jednadžbe budu univerzalno primjenjive na mostove diljem svijeta. Utjecaj predloženog projekta na struku očekuje se kroz razvoj pouzdanih empirijskih jednadžbi koje su prilagođene za primjenu na velikim rijekama, a za što u trenutnoj praksi ne postoje dovoljno pouzdane metode koje bi se mogle primijeniti u sustavima gospodarenja mostovima pri projektiranju ili procjeni stanja konstrukcije.

Literatura

- [1] Gilja, G., Kuspilić, N., Bekić, D.: Utjecaj degradacije korita na sigurnost mostova, Sabor hrvatskih graditelja 2012: Graditeljstvo - poluga razvoja, Lakušić, S., Cavtat, Hrvatska, Hrvatski savez građevinskih inženjera Zagreb, pp. (795-806), 2012
- [2] Tabarestani, M.K., Zarrati, A.R.: Local scour calculation around bridge pier during flood event, *Journal of Civil Engineering*, vol. 21, 2017, pp. (1462-1472), doi: 10.1007/s12205-016-0986-3
- [3] Arneson, L.A., Zevenbergen, L.W., Lagasse, P.F., Clopper, P.E.: Evaluating Scour at Bridges, Circular, H.E., pp. (71-73), 2012

- [4] Lagasse, P.F., Clopper, P.E., Zevenbergen, L.W., Girard, L.G.: Countermeasures to Protect Bridge Piers from Scour, National Academies of Sciences, E., Medicine, Washington, DC, 2007
- [5] Gilja, G., Kuspilić, N., Tečić, D.: Morphodynamic impact of scour countermeasures on riverbed topography, 15th International Symposium Water Management and Hydraulics Engineering, Bekić, D., *et al.*, Primošten, Croatia, Faculty of Civil Engineering Zagreb, Croatia, University of Zagreb, pp. (176-183), 2017
- [6] Kuspilić, N., Gilja, G.: Influence of watercourse flow on bridge safety, e-Zbornik: Electronic collection of papers of the Faculty of Civil Engineering, pp. (26-41), 2018
- [7] Anderson, A.G.: Scour at bridge waterways, U.S. Federal Highway Administration, 1974
- [8] Breusers, H.N.C., Nicollet, G., Shen, H.W.: Local Scour Around Cylindrical Piers, Journal of Hydraulic Research, vol. 15, 1977, pp. (211-252), doi: 10.1080/00221687709499645
- [9] Melville, B.W., Coleman, S.E.: Bridge Scour, Water Resources Publications, 2000
- [10] Unger, J., Hager, W.: Riprap Failure at Circular Bridge Piers, Journal of Hydraulic Engineering ASCE, vol. 132, 2006, pp., doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:4(354)
- [11] Julien, P.Y., Ruff, J.F., Ji, U.: Alternative designs of pier-scour protection for the Gupo and Subway Bridge on the Lower Nakdong River, 2006
- [12] Karaki, S.: Laboratory Study of Spur Dikes for Highway Bridge Protection Hydraulic model study of spur dikes for highway bridge openings, Washington DC, United States, Highway Research Board, 1959
- [13] Liu, H.K., Chang, F.M., Skinner, M.M.: Effect of bridge construction on scour and backwater, Fort Collins, Colorado: Civil Engineering Section, Colorado State University, 1961
- [14] Salami, Y., Masjedi, A.: Investigating the effect of spur dike length on its around riprap stability in a river bend Research Journal of Fisheries and Hydrobiology, vol. 2015, pp. (111-117)
- [15] Kuhnle, R., Alonso, C.: Flow near a model spur dike with a fixed scoured bed, International Journal of Sediment Research, vol. 28, 2013, pp. (349-357), doi: 10.1016/S1001-6279(13)60045-1
- [16] Wilson, K.V.: Scour at selected bridge sites in Mississippi, Jackson, Mississippi, Denver, 1995
- [17] Prendergast, L.J., Gavin, K.: A review of bridge scour monitoring techniques, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, vol. 6, 2014, pp. (138-149), doi: 10.1016/j.jrmge.2014.01.007
- [18] Gilja, G., Kuspilić, N., Potočki K.: Analiza primjenjivosti empirijskih modela za opis karakteristika polja dina, Građevinar, vol. 69, 2017, pp. (427-436), doi: 10.14256/JCE.1989.2017
- [19] Zaid, M., Yazdanfar, Z., Chowdhury, H., Alam, F.: Numerical modeling of flow around a pier mounted in a flat and fixed bed, Energy Procedia, vol. 160, 2019, pp. (51-59), doi: 10.1016/j.egypro.2019.02.118
- [20] Hung, C.-C., Yau, W.-G.: Vulnerability evaluation of scoured bridges under floods, Engineering Structures, vol. 132, 2017, pp. (288-299), doi: 10.1016/j.engstruct.2016.11.044
- [21] Mohammad, T.A., Megat Mohd Noor, M.J., Ghazali, A.H.: Validation of Some Bridge Pier Scour Formulae Using Field and Laboratory Data, American Journal of Environmental Sciences, vol. 1, 2005, pp., doi: 10.3844/ajessp.2005.119.125
- [22] Guven, A., Gunal, M.: Hybrid modelling for simulation of scour and flow patterns in laboratory flumes, International Journal for Numerical Methods in Fluids, vol. 62, 2009, pp. (291-312), doi: 10.1002/flid.2022

ODRŽIVA ENERGIJA & UPORABA U JAVNOJ VODOOPSKRBI **RENEWABLE ENERGY & EFFICIENCY IN PUBLIC WATER UTILITIES**

Tatjana Džeba¹, Marko Mimica², Maja Prskalo¹

(1) Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru, tatjana.dzeba@gf.sum.ba,
maja.prskalo@gf.sum.ba

(2) Euroconsultants, m.mimica@echr.hr

Sažetak

Kroz rad se ukratko prikazuje Projekt prijavljen na raspisani drugi poziv europskog projekta INTERREG CBC 2014.-2020. Nositelj projekta je Sveučilište u Mostaru-Građevinski fakultet, a partneri su javna poduzeća iz ova tri programska područja, te razvojna agencija RERA Split. Fokus je na uporabi sunčeve energije (fotonaponske energije-FN) u sustavima crpnih stanica u javnoj vodoopskrbi, čime se postiže ušteda u troškovima za utrošenu električnu energiju potrebnu za precrcpljivanje. Rezultati prijave se očekuju krajem godine.

Zbog potencijalnih ušteda troškova koje su pokazale analize, ovaj projekt bi, poput demonstracijskog projekta, mogao postati uspješan uzor za druge tvrtke koje djeluju na istom polju i žele se prebaciti na obnovljive izvore energije.

Ključne riječi: Interreg IPA CBC, obnovljiva energija, ekonomska i tehnička analiza, solarna energija, javna vodoopskrba

Abstract

The paper briefly presents the project submitted to the second call for proposals of the European project INTERREG CBC 2014.-2020. The project Lead partner is, University of Mostar- the Faculty of Civil Engineering, and the partners are public companies from these three program areas, as well as the regional development agency RERA SD Split. The focus is on the use of solar energy (photovoltaic energy-PV) in pumping station systems of public watersupply, which saves on the cost of electricity consumed for pumping. The results of the application are expected at the end of the year.

Due to the potential cost saving that the preliminary techno-economic analysis have shown, this project, like a demonstration project, could become successful role model for other companies operating in the same field that wish to switch to renewable energy sources.

Keywords: Interreg IPA CBC, renewable energy, economic and technical analysis, solar energy, public water utilities

1. Uvod

Analizirajući dosadašnja istraživanja u oblasti uporabe obnovljivih izvora energije, došlo se do spoznaje da je korištenje solarnih fotonaponskih sustava za rad crpnih stanica u vodoopskrbi održiv koncept [1], [2], [3] i da bi kao takav mogao biti zanimljiv za prijavljivanje na drugi poziv Interreg IPA CBC 2014.-2020. - prekograničnog programa trilateralne: Hrvatska, Bosna i Hercegovina i Crna Gora, pod prioritarnom osi 2 koja uključuje: zaštitu prirode i okoliša, poboljšanje prevencije rizika i promoviranje održive energije i energetske efikasnosti.

Projekt je prijavljen pod naslovom ODRŽIVA ENERGIJA & UPORABA U JAVNOJ VODOOPSKRBI, vodeći partner je Sveučilište u Mostaru-ustrojbeno jedinica Građevinski fakultet, a partneri su javna poduzeća iz tri programska područja (Komunalno d.o.o. Vrgorac (RH), JP Parkovi d.o.o. Ljubuški (BiH), i Vodovod i kanalizacija d.o.o. Bar (CG)), te regionalna razvojna agencija (javna institucija RERA SD, Split).

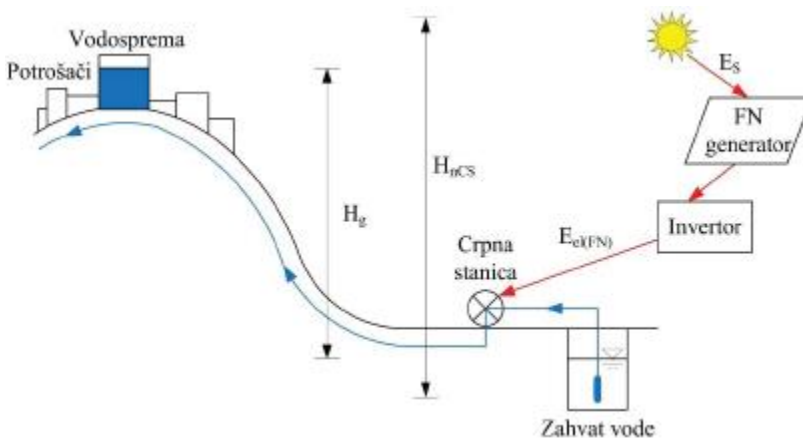
1.1. Dosadašnja istraživanja o mogućnosti primjene fotonaponskih solarnih sustava u javnoj vodoopskrbi

Glavni potrošači energije u javnoj vodoopskrbi su crpne stanice. Od ukupne potrošnje energije, na njihov rad otpada cca 80%. Tijekom dana i godine potrošnja vode ima sličan režim kao i potrošnja energije.

Smanjenje troškova energije, a time i utjecaja na klimatske promjene smanjenjem emisije CO₂ ostvaruje se smanjenjem ukupne potrošnje energije, izbjegavanjem korištenja skuplje vršne energije i korištenjem obnovljivih izvora energije.

Za reguliranje režima crpljenja vode i potrošnje vode u vodoopskrbnom sustavu glavnu ulogu ima objekat vodospremnika, čijim volumenom se izravnavaju neravnomjernosti u potrošnji vode i potrošnja energije iz vršnog perioda može se pomaknuti u period niže tarife [1].

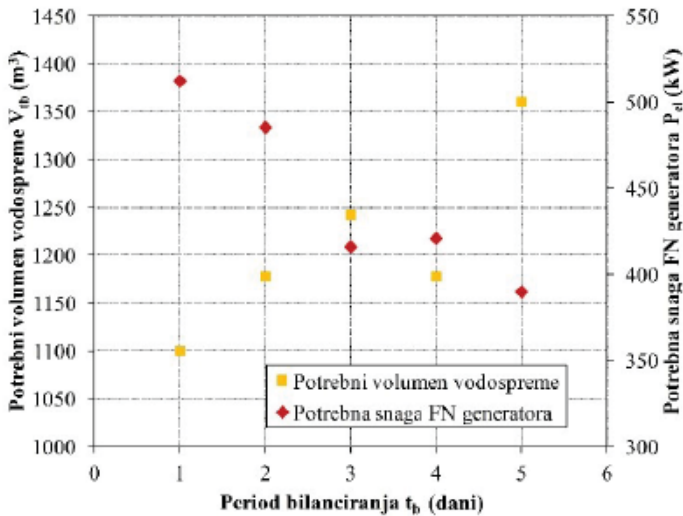
Slika 1 pokazuje tzv. Koncept hibridnog sustava "FN generator - crpna stanica - vodosprema" kojim se osigurava kontinuirani dotok vode stanovništvu.



Slika 1. preuzeto iz [2], Koncept kontinuirane opskrbe energijom vodnog sustava

Transformacija solarne energije u električnu energiju vrši se putem fotonaponskih sustava. Dimenzioniranje fotonaponskog sustava u smislu odabira snage u direktnoj je vezi s periodom bilanciranja o čemu ovisi i volumen vodospreme. Produljenjem perioda bilanciranja smanjuje se

potrebna snaga FN sustava i povećava volumen vodospreme, a kako je cijena FN sustava značajno veća od cijene izgradnje volumena vodospreme proizlazi da je povoljnije primijeniti duže periode bilanciranja, što je istraživano u [1] i [2], i vidljivo na Slici 2.



Slika 2. preuzeto iz [2], Potrebni volumen vodospreme i snaga FN generatora u funkciji perioda bilanciranja

Aspekt ekonomičnosti ovakvih rješenja ovisi o tome što se želi postići. Sunce kao izvor energije je besplatan, a troškovi izgradnje FN generatora se stalno smanjuju [4], te se može reći da se isplativost primjene planiranog koncepta povećava. Postupno uvođenje obnovljive energije povećava održivost vodoopskrbnih sustava, te daje doprinos zaštiti okoliša.

1.2. Projektno područje i energetska održivost

Promatrajući broj sunčanih dana i visinu prosječne temperature na razmatranom programskom području, solarna energija je dostupan obnovljivi resurs u Hrvatskoj, Bosni i Hercegovini i Crnoj Gori, te navedeni vremenski uvjeti rezultiraju visokom iskoristivošću energetskog sustava temeljenog na solarnoj energiji. Najvažnija prednost ovog sustava nad drugim sustavima je okolišna održivost.

Obzirom na to da se projektni partneri nalaze na Mediteranu gdje je energetska potencijal sunčevog zračenja velik, zaključeno je da bi se trebala provoditi analiza mogućnosti napajanja crpnih stanica za vodoopskrbu iz fotonaponskih solarnih panela tijekom dana.

Sa stajališta održivosti, korištenje solarne energije je najpovoljnije jer je ona primarna i kao takva izvor svih ostalih obnovljivih energija. S druge strane, FN tehnologija je najjednostavnija sa značajnim trendom smanjenja cijene, te trendom povećanja učinkovitosti. Funkcionalna ovisnost između FN-a, volumena vodospreme i crpne stanice je analizirana u [3], a analiza ove vrste nužna je radi cjelovitog shvaćanja načina rada vodoopskrbnog sustava pokretanog FN energijom, koji primjenom Metode kritičnog perioda u stvari postaje energetska održiv vodoopskrbni sustav.

Uzimajući u obzir postojeći potencijal obnovljivih izvora energije na programskom području, kao i potrebu za jačanjem energetske učinkovitosti, kroz ovaj projekt će se istraživati mogućnost

da se razmatranim potencijalom doprinese održivom korištenju energije i jačanju energetske učinkovitosti, posebno u javnoj infrastrukturi, tj. javnoj vodoopskrbi.

2. Provedene analize i glavni rezultati istraživanja

Sva tri partnera iz javnih poduzeća koja sudjeluju u ovom Projektu imaju velike troškove/rashode za električnu energiju i posluju na rubu likvidnosti.

U cilju osiguranja tekućeg poslovanja, provedeno je istraživanje o najbržim, najisplativijim, ekološki prihvatljivim i energetski učinkovitim rješenjima za opskrbu električnom energijom crpki za vodu.

Provedena je preliminarna ekonomsko-tehnička analiza za vodovodne sustave Ljubuški i Vrgorac.

Analiza je pokazala da je tijekom 2017. godine ukupna potrošnja električne energije za sustav Ljubuški iznosila cca.1,63 milijuna kWh. Ugradnjom fotonaponskih solarnih panela godišnje se može generirati iznos od oko 1,15 milijuna kWh. Navedeno bi pokrivalo oko 70% svih potreba za vodosnabdijevanjem električne energije u Ljubuškom i mogli bi uštedjeti oko 76.000 eura godišnje.

Što se tiče vodoopskrbnog sustava Vrgorac, analiza je pokazala da je tijekom 2017. godine potrošeno 1,81 milijuna kWh. Zahvaljujući fotonaponskim solarnim ćelijama / pločama moguće je proizvesti oko 1,54 milijuna kWh, što je oko 85% njihovih potreba za električnom energijom. Izraženo ekonomskom vrijednošću, ukupna godišnja ušteda troškova vodoopskrbnog sustava Vrgorac iznosila bi preko 100.000 eura godišnje.

Glavni rezultat ovog projekta bio bi smanjenje troškova za električnu energiju uz istovremeno povećanje energetske učinkovitosti korištenjem obnovljivih izvora energije, kao i neovisno opskrbljivanje energijom tijekom dnevnog svjetla. Treba naglasiti da će neke manje crpne stanice za vodu koje rade isključivo tijekom dana imati potpunu autonomiju u pogledu sustava distribucije električne energije i da će biti osigurana opskrba energijom iz obnovljivih izvora energije.

Takav vodoopskrbni sustav s FN solarnim panelima bio bi prvi u Hrvatskoj, Bosni i Hercegovini i Crnoj Gori., gdje će provedena studija izvodljivosti analizirati potrošnje električne energije, procijeniti proizvodni potencijal i namirenje potrošnje električne energije iz fotonaponskih sustava, a izvedeni pilot i / ili pokazni pogoni pokazat će funkcionalnost ove vrste napajanja.

3. Zaključak

Realizacija ovog projekta mogla bi otvoriti niz rješenja za ostale vodoopskrbne sustave čija će razina likvidnosti adekvatno biti povećana korištenjem obnovljivih izvora energije, energetske učinkovitosti i smanjenjem emisija onečišćujućih tvari u zraku.

Kao izravni učinak projekta ističe se nadogradnja infrastrukture u energetskom sektoru , koja će značiti cjelokupno povećanje energetskih kapaciteta u smislu obnovljivih izvora energije, podržavajući podizanje kapaciteta za bolje upravljanje energijom, razmjenu iskustava, praksi i inovativnih projekata koji pridonose smanjenje emisije CO₂ i potrošnje energije, primjene inovativnih tehnologija i rješenja u području održive energije i energetske učinkovitosti.

Ovaj pilot projekt može poslužiti i kao podloga za detaljnija istraživanja u smislu: izrade simulacijskog modela rada sustava, izrade ekonomske analize sustava, analize utjecaja sustava na cijenu vode kao i prihvatljivosti vezano za socijalne, ekonomske, ekološke kriterije te pouzdanost rada, i kao takav poslužiti za primjenu višekriterijalnih metoda u izboru optimalnog rješenja.

Literatura

- [1] Margeta, J., Đurin, B.: Mogućnost primjene obnovljivih izvora energije za crpljenje vode u urbanom vodnom sustavu, Hrvatske vode na investicijskom valu, 6. hrvatska konferencija o vodama, Opatija, (1135-1143.), svibanj 2015.
- [2] Đurin, B.: Karakteristike koncepta poboljšanja rada vodoopskrbnog sustava zasnovanog na korištenju solarne fotonaponske energije, Inženjerstvo okoliša, vol.4, No.1, 2017., (41-49)
- [3] Baić, L., Đurin, B.: Analiza održivosti urbanog vodoopskrbnog sustava pokretanog sunčevom energijom i zavisnost veličina njegovih pojedinih dijelova, Hrvatske vode, 24 (2016), 98, (285-294)
- [4] Green, M.A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W.: Solar cell efficiency tables (version 49), Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 25(3-13), 2017.

DETERMINATION OF AQUIFER PARAMETERS USING TIDAL METHODS: RIVER NERETVA VALLEY AQUIFER

ODREĐIVANJE PARAMETARA VODONOSNIKA NA PODRUČJU UŠĆA RIJEKE NERETVE PRIMJENOM "TIDAL METHODS"

Ivan Lovrinović¹, Veljko Srzić¹

(1) Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split,
ivan.lovrinovic@gradst.hr, veljko.srzic@gradst.hr

Abstract

Even though river Neretva valley aquifer has been objective of different research groups more than 50 years no clear picture has been conducted up to date. This paper demonstrates the possibility of tidal methods application to river Neretva valley aquifer and the reliability of those results. From the existing monitoring network with continuous hourly based observed time series of the sea level and aquifer piezometric heads, three random periods of four days duration were taken into consideration. Data sets were analysed via numerical model and solutions proposed by Jiao and Tang 1999., Dong et al. 2012. And Xia et al. 2007. To obtain unknown aquifer parameters. To support obtained results, slug test have been performed on site to reduce the uncertainty of the results. Results show reliable values of unknown parameters and robustness of model when applied on other periods.

Keywords: tidal methods, Neretva, hydraulic diffusivity, aquifer parameters

Sažetak

Iako su istraživanja na području ušća rijeke Neretve započeta prije više od 50 godina, izgled i parametri vodonosnika oko ušća do danas nisu jasno definirani. Ovaj rad prikazuje mogućnost primjene „Tidal methods“ na vodonosnik rijeke Neretve i pouzdanost dobivenih rezultata. Postojeći monitoring sustav na promatranom području ima kontinuirano satno praćenje razine mora te potencijala u vodonosnicima. Iz postojećih podataka tri su perioda uzeta za istraživanje. Odabrani periodi imaju duljinu trajanja od četiri dana, te su analizirani numeričkim modelom i analitičkim rješenjima koja su predložili Jiao i Tang 1999., Dong i ostali 2012. i Xia i ostali 2007. kako bi se nepoznati parametri odredili. Na postojećem piezometru je dodatno napravljen slug test kako bi se smanjila nepouzdanost dobivenih rezultata. Dobiveni rezultati pokazuju realne vrijednosti nepoznatih parametara i robusnost metode prilikom primjene na druge promatrane periode.

Gljučne riječi: tidal methods, Neretva, hidraulička difuzivnost, parametri vodonosnika

1. Introduction

In most coastal areas there is a significant connection between seawater and groundwater which leads to the fact that agricultural fields within the coastal areas are negatively affected by the intrusion of seawater, dominantly through the reduced crop productivity. To mitigate saltwater intrusion and its negative effects it is necessary to determine aquifer characteristics. Geophysical techniques such as geo-electric and/or seismic reflection/refraction are often used to determine aquifer characteristics. High cost of those surveys led to alternative ideas and methods such as tidal methods. Jacob (1950) introduced analytical solution of the piezometric head within the confined aquifer. Solution of Jacob (1950) was based on ideal assumptions thus being limited in being applied reliably in case studies. Up to date, many analytical solutions have been developed for different conceptual models, increasing the possibility to be applied under different conditions. One of the earliest solutions to determine aquifer characteristics using tidal methods was developed by Carr and Van der Kamp (1969). Jiao and Tang (1999) derived analytical solution for leaky confined aquifer system parameter determination. Furthermore, Xia et al. (2007) gave analytical solution for leaky confined aquifer with roof that extends under the sea when coupled to outlet capping. Dong et al. (2012) proposed analytical solution based on observed seawater table variations, compared to solution of Jiao and Tang (1999) whose solution was based on the finite number of harmonics of the long term sea water oscillations. Guarracino et al. (2012) did similar research as [4]. The necessity of the knowledge of the aquifer parameters and its geological characterization through the influence of the salt water intrusion process was demonstrated in work by Vallejos et al. (2015).

2. Methodology

2.1. Theoretical background

Analysis starts with the hypothesis of significant connection between borehole D1 and seawater table oscillations. Signals observed from seawater and D1 are initially analyzed in frequency domain (power spectrum in Figure 2). Significant correlation emphasizes the fact that confined aquifer is under direct influence of seawater table variations. As solutions presented in [3] and [4] require sea level time series as a superposition of sine functions, results from power spectrum have been used to determine number of dominant frequencies (Figure 4.) with corresponding values of amplitude, period and phase.

Equation (1) describes the propagation of the piezometric front within the aquifer,

$$S \frac{\partial h(x,t)}{\partial t} = T \frac{\partial^2 h(x,t)}{\partial x^2} + L_S (h_s - h) \quad (1)$$

with $h(x,t)$ being piezometric head [m] on given location in given time, S and T are respectively, storativity or storage coefficient [-] and transmissivity [m^2/s], L_S is leakage between aquifers [$1/day$] and h_s [m] is mean sea level in unconfined aquifer. To determine hydraulic diffusivity of the aquifer, analytical solutions derived from partial differential Eq. (1) presented in [3, 4 and 5] for both conceptual models are used with previously determined leakage, transmissivity and storativity.

2.2. Monitoring system in river Neretva valley aquifer

In last decade, a monitoring system has been established in Neretva river valley to understand saltwater intrusion and dynamic relations between the piezometric head and seawater table variations. 8 boreholes were drilled, 4 in unconfined aquifer and 4 in confined aquifer. Simultaneously, seawater and river water surface dynamic features have been observed. Of the most importance for this paper is a piezometer D1 located 80 m from the coast line. Three different time periods were taken into consideration; all three periods have duration of four days, correspond to syzgy type tide and dry season (without influence of precipitation).

2.3. Conceptual models

Two conceptual models were considered as potential to determine aquifer parameters; transmissivity, storativity, hydraulic diffusivity and leakage. First conceptual model is defined with three layers, unconfined and confined layers separated with semipermeable layer, with vertical beach and impermeable bottom (Figure 1) and correspond to conceptual model analyzed in [3 and 5]. Second conceptual model is similar to the first one with addition to the first one to account for the effects of extending roof and outlet-capping (Figure 1) [4 and 6].

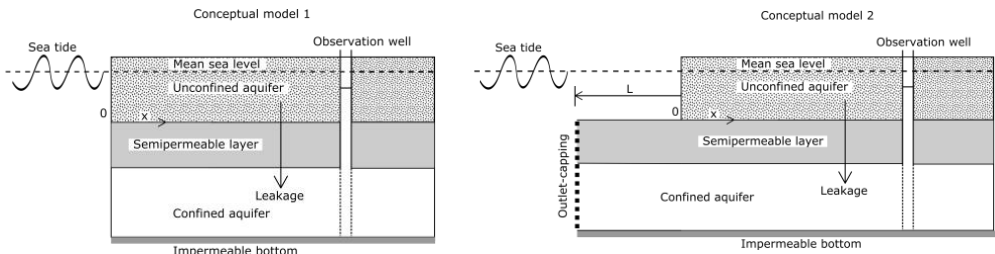


Figure 1. Conceptual models

2.4. Uncertainty reduction

Due to the lack of in situ method results up to date in Neretva valley, no clear geological description of the analyzed area is available. To bridge the problem, in situ slug tests were performed to obtain the average hydraulic conductivity value equal to 2.2×10^{-5} [m/s]. Available piezometer D1 log was used to identify confined aquifer thickness $b = 1.20$ [m].

3. Results

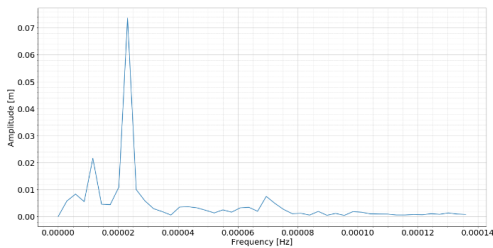


Figure 2. Spectrogram of observed seawater signal (2014.)

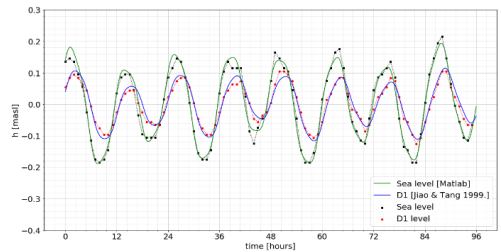


Figure 3. Observed and modeled D1 piezometric head (Jiao & Tang (1999))

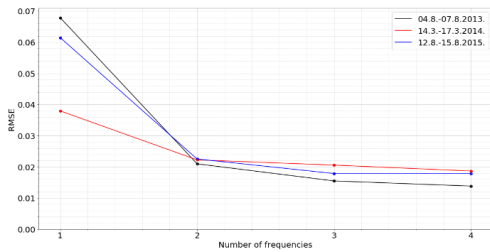


Figure 4. Contribution of separated constituent to observed seawater signal

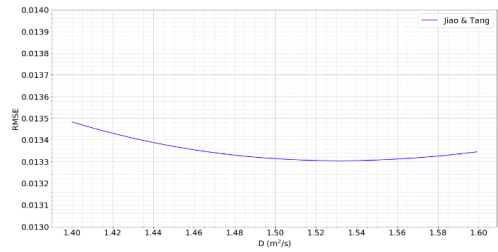


Figure 5. RMSE between observed and modeled signal in D1 for diff. values of diffusivity and $L_s=0$

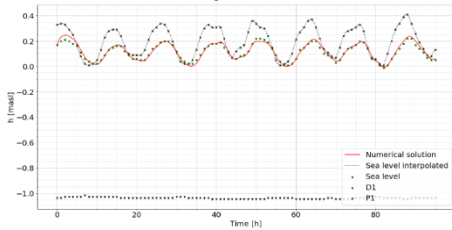


Figure 6. Observed seawater and D1 piezometric and numerically obtained head

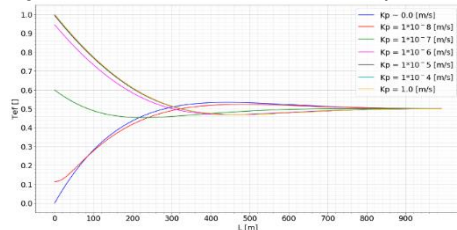


Figure 7. Tidal efficiency T_{ef} (for $x=0$ [m]) dependence on variable roof length and permeability of the outlet-capping

For the boundary and initial conditions as found on site and for three analyzed periods, one determines negligible leakage through the semipermeable layer ($L_s = 10^{-5}$ /day) and storativity of order of magnitude 10^{-5} by numerical solution of the Eq. 1., based on FD and RK4 methods (RMSE = 0.001) (Figure 5). By minimization of RMSE between observed and obtained piezometric heads at D1, the hydraulic diffusivity has been determined (Figure 3 and Figure 6). Significance of each aquifer parameter (Figure 7) is investigated to quantify the influence to the piezometric head oscillation at D1. For wide range of combinations of different parameter values (length of the roof extending under the sea L [m], outlet capping permeability K_p [m/s] and loading efficiency Le [-]) as a result of hydraulic diffusivity in confined aquifer we determine $D = 1.0 - 1.5$ [m^2/s] for the first conceptual model, and $D = 7.0 - 18.0$ [m^2/s] when applied to second conceptual model. Compared to present results and case studies, as well as by taking into consideration physical background of analyzed conceptual models, difference in obtained hydraulic diffusivity values presents a reliable forecast [7]. To further reduce the uncertainty in aquifer parameters determination, a pumping test can be performed to determine aquifer storativity, while in-situ geophysical investigation can lead to the reliable conceptual model.

Literature

- [1] Jacob, C.E., Flow of groundwater in engineering hydraulics, Wiley, New York, (1950.)
- [2] Carr, P.A., van der Kamp, G.S., Determining aquifer characteristics by the tidal methods, *Water Resources Research*, 5 (5), (1969.), 1023–1031
- [3] Jiao J.J., Tang Z., An analytical solution of groundwater response to tidal fluctuation in a leaky confined aquifer, *Water Resources Research*, 35(3), (1999.), 747-751
- [4] Xia Y., Li H., Boufadel M.C., Guo Q., Li G., Tidal wave propagation in a coastal aquifer: Effects of leakages through its submarine outlet-capping and offshore roof, *Journal of Hydrology*, 337, (2007.), 249-257, doi:10.1016/j.jhydrol.2007.01.036
- [5] Dong, L., Chen, J., Fu, C., Jiang, H., Analysis of groundwater level fluctuation in a coastal confined aquifer induced by sea-level variation, *Hydrogeology Journal*, 20(4), (2012.), 719–726, 10.1007/s10040-012-0838-2
- [6] Luis Guarracino, Jesús Carrera, Enric Vázquez-Suñé, Analytical study of hydraulic and mechanical effects on tide-induced head fluctuation in a coastal aquifer system that extends under the sea, *Journal of Hydrology*, 450-451, (2012.), 150-158, 10.1016/j.jhydrol.2012.05.015
- [7] Vallejos, A., Sola, F., Pulido-Bosch, A., Processes influencing groundwater level and the freshwater-saltwater interface in a coastal aquifer, *Water Resources Management*, 29(3), (2015.), 679-697, 10.1007/s11269-014-0621-3

PRIMJENA VLAKANA BRNISTRE ZA OJAČANJE CEMENTNOG NOSIVOG SLOJA KOLNIČKE KONSTRUKCIJE

THE USE OF SPANISH BROOM FIBERS FOR REINFORCEMENT OF CEMENT-STABILISED LAYER OF PAVEMENT

Daniela Dumanić¹

(1) Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, ddumanic@gradst.hr

Sažetak

U današnje vrijeme se pronalaze različiti materijali koji se dodaju cementnoj stabilizaciji u svrhu njezinog poboljšanja. Posebno se težište stavlja na ekonomičnije i ekološki prihvatljivije projektiranje slojeva kolničke konstrukcije. Ojačanje cementne stabilizacije može se postići dodavanjem vlakana, čiji je zadatak odgoditi širenje pukotina. Na mediteranskom području mogući izvor celuloznih vlakana nalazi se u samonikloj biljci brnistri (*Spartium junceum* L.). U radu su navedeni rezultati i zaključci dosadašnjih istraživanja te se na osnovu toga planira provesti opsežnije istraživanje utjecaja načina maceracije, duljine i količine vlakana brnistre na mehanička svojstva cementne stabilizacije.

Ključne riječi: cementna stabilizacija, vlakna, brnistra

Abstract

Nowadays, various materials are added to cement stabilisation for the purpose of its improvement. Special emphasis is placed on more economical and environmentally friendly design of pavement layers. Reinforcement of cement stabilisation can be achieved by the addition of fibers, whose task is to delay crack propagation. In the Mediterranean area, a possible source of cellulose fibers is found in the wild plant named Spanish Broom (*Spartium junceum* L.). The results and conclusions of previous studies are given in this paper and detailed testing of the influence of maceration, length and amount of fiber on the mechanical properties of cement stabilisation is planned.

Keywords: cement stabilisation, fibers, Spanish broom

1. Uvod

Gornji ustroj prometnica preuzima opterećenja nastala na cestovnoj prometnici i na drugim prometnim površinama te ih prenosi na temeljno tlo. Prometna opterećenja se prenose preko kolničke konstrukcije, a izazivaju naprezanja i deformacije u konstrukciji i tlu. Usljed prometnog opterećenja i drugih utjecajnih čimbenika kao što su temperatura i vlaga, neophodno je zadržati veličine naprezanja i deformacija u granicama koje odabrani materijali i tlo mogu podnijeti omogućavajući sigurnost i udobnost vožnje i osiguravajući mehaničku otpornost i stabilnost ceste bez štetnih posljedica. Osim cesta i gradskih ulica, projektiraju se i parkirališta, aerodromske površine, pločnici, pješačke i biciklističke staze, podovi u skladištima, zastori na cestovnim mostovima.

S ciljem održivosti korištenja građevinskih materijala kao i bolje zaštite okoliša, u posljednje vrijeme se u proizvodnji i primjeni cestograđevnih materijala istražuje mogućnost korištenja otpadnih i recikliranih materijala kao zamjene za prirodne resurse, a isto tako se ispituje mogućnost primjene prirodnih, obnovljivih materijala koji ugradnjom u već postojeće standardne materijale mogu doprinijeti poboljšanju mehaničkih svojstava slojeva u kolničkoj konstrukciji. U tom smislu, dodavanjem prirodnih ili recikliranih vlakana kao ojačanja te primjenom otpadnih materijala (leteći pepeo, čeličanska zgura, građevinski otpad, biopepeo, itd.) kao zamjene tradicionalnim prirodnim materijalima, pokušava se ostvariti što kvalitetnije projektiranje kolničkih konstrukcija prometnica i ostalih prometnih površina.

Dodavanjem vlakana u standardni materijal, odnosno mikroarmiranjem, nastoji se spriječiti ili odgoditi širenje pukotina na način da se nastala naprezanja vlaknima prenose na susjedne presjeke. Vlakna mogu biti sintetička, čelična i prirodna. Prirodna vlakna su lokalno dostupna, ekonomična, obnovljiva su i razgrađiva. Zbog svoje dostupnosti na mediteranskom području, pa tako i u Splitu i okolici, moguće je upotrijebiti biljna vlakna brniste za ispitivanje poboljšanja cementnog nosivog sloja kolničke konstrukcije.

2. Ojačanje kolničke konstrukcije vlaknima brniste

2.1. Ojačanje cementne stabilizacije

Kolnička konstrukcija je višeslojni sustav koji se sastoji od različitih slojeva različitih debljina, a cjelokupno obuhvaća kolnički zastor, jedan ili više nosivih slojeva i sloj za zaštitu od smrzavanja ako je potrebno. Nosivi sloj je dio sustava kolničke konstrukcije izgrađen od nevezanog zrnatog materijala i/ili materijala vezanog određenim vezivom. Ovakav sloj kojeg čine mješavina zrnatog kamenog materijala određenog stupnja zbijenosti, hidrauličko vezivo cement i voda se naziva cementna stabilizacija [1]. Nosivi sloj stabiliziran cementom ima znatnu krutost jer cement zrnatim materijalima povećava tlačnu i vlačnu čvrstoću, modul elastičnosti te otpornost na promjenu vlažnosti pa predstavlja dobru podlogu za gornje kolničke slojeve. Također, može preuzeti veliki dio naprezanja pa tako rasterećuje posteljicu. S obzirom da pri cementnoj stabilizaciji raste čvrstoća tokom vremena, kolnička konstrukcija se lako može prilagoditi porastu prometnog opterećenja koje se događa s vremenom [2]. Pri dugotrajnom opterećivanju prometom dolazi do postepenog umora materijala i do postepenog nastanka deformacija i pukotina koje u konačnici rezultiraju nepovratnim (plastičnim) stanjem. U cementnoj stabilizaciji je potrebno osigurati da horizontalno vlačno naprezanje koje se pojavljuje pri donjoj površini sloja, bude manje od dopuštenog naprezanja. Također, proučava se promjena karakteristika materijala (čvrstoća i otpornost stabilizacijske mješavine) izraženim kroz Youngov modul elastičnosti i Poissonov koeficijent. Iako se kriterij sloma cementom stabiliziranih materijala većinom veže uz zamor materijala, pri velikom broju ponavljanja prometnog opterećenja, mehanizam sloma cementom stabiliziranih slojeva može se prikazati u tri koraka. Nakon ugradnje sloja javljaju se pukotine zbog skupljanja materijala (hidratacije) neovisno o tome što su količine cementa kod ovih materijala male u odnosu na one u betonu. Pukotine se zatim šire pod djelovanjem promjene

temperature, ovisno o modulu elastičnosti sloja i koeficijentu temperaturnog širenja [2]. Pojava pukotina u materijalu smanjuje vrijednost modula elastičnosti za cca 50% [3], pri čemu se smanjuje kolnička nosivost te se stvara mreža pukotina koja se pod djelovanjem prometnog opterećenja reflektira u gornji sloj tj. na površinu kolnika. Da bi se spriječilo ili odgodilo reflektiranje pukotina, neophodno je zadržati dovoljnu otpornost cementno vezanog nosivog sloja pa se, za poboljšanje njegovih svojstava i trajnosti, ispituju mogućnosti dodavanja čeličnih, sintetičkih i prirodnih vlakana kao i dodavanja drugih materijala (leteći pepeo, zgura, reciklirana guma).

Sobhan i Mashnad [4][4] su kolniku s uvaljanim betonom dodavali dijelove polietilenske otpadne plastike i zaključili da je granica izdržljivosti kao i u standardnih kolnika. U svojim istraživanjima Farhan i suradnici [5][6] cementnu stabilizaciju ojačavaju recikliranim čeličnim vlaknima iz starih guma pri čemu zaključuju da ovako ojačana cementna stabilizacija ima veću vlačnu čvrstoću i žilavost. Poboľšano je ponašanje materijala prije i poslije pucanja pa se zaključuje da dolazi do smanjenja reflektirajućih pukotina. Preporučuju korištenje ovakvog ojačanja s udjelom cementa ne manjim od 5%. Barišić i suradnici [7][8] kroz različite udjele cementa i čelične zgure pokazuju promjenu dinamičkog modula elastičnosti. Mješavine su izložene ciklusima smrzavanja-odmrzavanja te im se ovakvim izlaganjem smanjuje tlačna čvrstoća, ali manje nego mješavinama u kojima nije dodana čelična zgura. U svom radu Peng i Qingfu [9] istražuju mehanička svojstva i svojstva skupljanja pri mješavinama cementne stabilizacije i polipropelinskih vlakana. Iznose prednosti ojačanja cementne stabilizacije vlaknima do 0.1 % kroz rezultate povećane čvrstoće, otpornosti na deformacije i utjecaja na skupljanje. Zheng i suradnici [10] ispitivali su svojstva cementne stabilizacije ojačane bazaltnim vlaknima te su rezultati pokazali veću savojnu čvrstoću bez značajnijeg utjecaja na tlačnu čvrstoću materijala.

Na temelju dosadašnjih rezultata istraživanja, dodavanjem vlakana nastoji se ojačati sloj cementne stabilizacije i odgoditi pojava pukotina. Uglavnom su primjenjivana industrijski proizvedena vlakna dok je malo istraživanja s prirodnim vlaknima. Danas se kao zamjena za čelična i sintetična vlakna pokušavaju sve više koristiti prirodna vlakna (juta, konoplja, lan, ramija, sisal,...). Prednost prirodnih u odnosu na ostala vlakna jest u tome što su lokalno dostupna, ekonomična, biorazgradiva, obnovljiva, male gustoće, sigurnija za rukovanje i proizvodnju, nisu abrazivna pa štede opremu, nisu vodiči, itd., a imaju potrebna mehanička svojstva za poboljšanje kompozita [7].

Zbog svojih karakteristika, brnistra je jedna od potencijalnih biljaka čijim bi se vlaknima moglo utjecati na karakteristike cementne stabilizacije.

2.2. Značajke vlakana brnistre

Brnistra (Slika 1) je višegodišnja grmolika biljka koja obitava na jadranskoj obali i nema pravilo rasporeda rasta. Uglavnom raste kao grm visine od 1 m (1.5m) iako može doseći i visine do 5 m. [12]. Tipična je za mediteransko podneblje, može se naći kao samonikla ili uzgojena. Njeno korijenje je dobro razvijeno, a žile su čvrste i dobro ukopane u tlo. Grane su vrlo žilave, a sastoje se od unutarnjeg i vanjskog sloja. Unutrašnji sloj je je krut i drvenast s poroznom sredinom, a vanjski dio je sačinjen od žilavih vlaknastih stanica **Error! Reference source not found..**



Slika 1. Grm brnistre

Izbojci brnistre imaju visok udio celuloze te se mogu nazivati celuloznim vlaknima. Vlakna su kratki elementi s različitim omjerima duljine i promjera, povećane vlačne čvrstoće i fleksibilnosti. Uloga njihova dodavanja u drugi materijal poput cementa je odgoditi širenje mikropukotina. Na Slici 2 je prikazan primjer dodanih prirodnih vlakana brnistre u cementni mort.



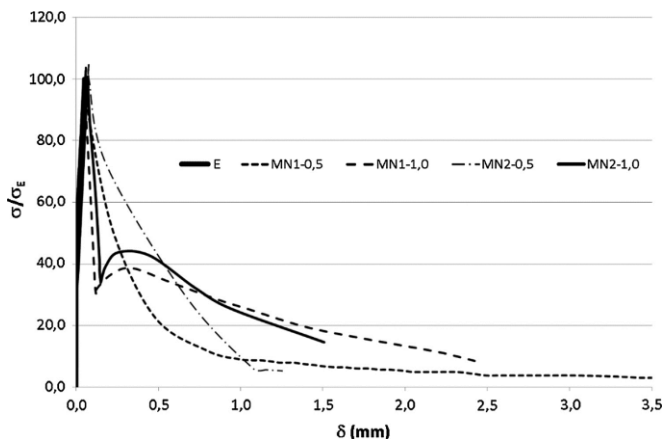
Slika 2. Vlakna brnistre u cementnom mortu

Kvaliteta vlakana ovisi o površinskoj hrapavosti, načinu dobivanja vlakana, geografskim i klimatskim uvjetima te o kemijskom sastavu pri čemu najveću ulogu ima udio celuloze, hemiceluloze i lignina **Error! Reference source not found..** Prema **Error! Reference source not found.**[13], vlačna čvrstoća brnistre je u granicama 400-750 MPa, i pokazuje da joj je vrijednost vlačne čvrstoće u području kao kod većine prirodnih vlakana (Tablica 1).

Tablica 1. Vlačna čvrstoća biljnih vlakana

Biljka	Vlačna čvrstoća [MPa]
Brnistra	400-750
Juta	320-800
Konoplja	310-750
Lan	500-900
Pamuk	300-700
Ramija	400-1000
Sisal	363-700

Angelini i suradnici [13] su svojim istraživanjima dobili modul elastičnosti vlakna brnistre 21,5 GPa te smatraju da su povoljna za ojačanje nekih kompozitnih materijala. Juradin i suradnici [11] su vlakna brnistre koristili za ojačanje cementnog morta. Dobiveni rezultati pokazali su da su vlakna duljine 10 i 30 mm najviše doprinijela čvrstoći na savijanje, dok duža vlakna lošije djeluju na tlačnu čvrstoću uzoraka. Međutim, nedostaci vlakana su trajnost, ograničeno doziranje jer veća količina vlakana otežava ugradnju te otežava jednolikost rasporeda vlakana u uzorku. Nedostatak je i odstupanje u kvaliteti pojedinih vlakana brnistre. Povećanje trajnosti vlakana moguće je postići obradom vlakana prije njihove ugradnje kao što je tretiranje vlakana natrijevim hidroksidom. Neekka i suradnici [14] su ispitivali upijanje vode u uzorcima ojačanim s 10 do 50 % vlakana brnistre i zaključili da je upijanje vode veće pri većem udjelu vlakana. Prema ispitivanju uzoraka cementnog morta ojačanim vlaknima brnistre, Juradin i suradnici [15] zaključuju da ojačani uzorci vlaknima mogu preuzeti opterećenje, dok se uzorak etalona trenutno lomi (Slika 3) što je u konačnici i svrha mikroarmiranja. Uspoređivali su uzorak etalona (oznaka E) s uzorcima čija su vlakna dobivena putem maceracije u morskoj vodi i 5%-tnoj otopini NaOH (oznaka MN).



Slika 3. $\sigma / \sigma_E - \delta$ dijagram

Dosadašnjim istraživanjima se pokazalo da se čvrstoća vlakana može povećati smanjenjem njihove duljine te da ova vlakna mogu biti potencijalna zamjena umjetnim vlaknima u kompozitima.

3. Zaključak i ciljevi istraživanja

S obzirom na dosadašnja istraživanja i potrebu za korištenjem održivih materijala u kombinaciji s kolničkim slojem cementne stabilizacije, pokušava se znanstveno razviti nova, poboljšana struktura kolničke konstrukcije. Razvija se pristup dizajniranju cementne stabilizacije ojačane vlaknima brnistre kako bi se smanjilo strukturno oštećenje unutar slojeva s posljedicama pojavljivanja pukotina koje nisu povezane s opterećenjem, oštećenja uslijed prometnog opterećenja te reflektiranje pukotina na površinu kolnika. Vlakna brnistre nisu dostupna na tržištu, pa je potrebno osigurati vlakna za ovo ispitivanje. Nakon berbe grančica brnistre, za dobivanje vlakana primijeniti će se nekoliko načina maceracije, a dobivena vlakna će se ručno kidati na nekoliko duljina. Sam postupak maceracije je ujedno i tretman vlakana u cilju povećanja trajnosti. U nekoliko različitih mješavina cementne stabilizacije, varirat će se različito tretirana vlakna, duljina vlakana i volumni udio vlakana. Na izrađenim mješavinama napraviti će se ispitivanja u

svježem i čvrstom stanju, s težištem na mehanička svojstva i trajnost uzoraka, donijeti zaključci na temelju dobivenih rezultata i dati smjernice za eventualna daljnja istraživanja.

Literatura

- [1] IGH: Opći tehnički uvjeti za radove na cestama, Knjiga III, Kolnička konstrukcija, 2001
- [2] Barišić, I., Rukavina, T., Dimter, S.: Cementne stabilizacije-karakteriziranje materijala i projektni kriteriji, *Građevinar*, 63(2), 2011, (135-142)
- [3] Babić, B.: Projektiranje kolničkih konstrukcija, Zagreb, 1997
- [4] Sobhan, K., Mashnad, M.: Fatigue damage in roller-compacted pavement foundation with recycled aggregate and waste plastic strips, *Transportation research record*, 1798(1), 2002, (8-16), 10.3141/1798-02
- [5] Farhan, A. H., Dawson, A. R., Thom, N. H.: Damage propagation rate and mechanical properties of recycled steel fiber-reinforced and cement-bound granular materials used in pavement structure, *Construction and Building Materials*, 172, 2018, (112-124), 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.239
- [6] Farhan, A. H., Dawson, A. R., Thom, N. H.: Recycled hybrid fiber-reinforced & cement-stabilized pavement mixtures: Tensile properties and cracking characterization, *Construction and Building Materials*, 179, 2018, (488-499), 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.233
- [7] Barišić, I., Dimter, S., Rukavina, T.: Elastic properties of cement-stabilised mixes with steel slag, *International Journal of Pavement Engineering*, 17(9), 2016, (753-762), 10.1080/10298436.2015.1019496
- [8] Barišić, I., Marković, B., Zagvozda, M.: Freeze-thaw resistance assessment of cement-bound steel slag aggregate for pavement structures, *International Journal of Pavement Engineering*, 20(4), 2019, (448-457), 10.1080/10298436.2017.1309192
- [9] Peng, Z., Qingfu, L.: Effect of polypropylene fibre on mechanical and shrinkage properties of cement-stabilised macadam, *International Journal of Pavement Engineering*, 10(6), 2009, (435-445), 10.1080/10298430802363985
- [10] Zheng, Y., Zhang, P., Cai, Y., Jin, Z., Moshtagh, E.: Cracking resistance and mechanical properties of basalt fibers reinforced cement-stabilized macadam, *Composites Part B: Engineering*, 165, 2019, (312-334), 10.1016/j.compositesb.2018.11.115
- [11] Juradin, S., Boko, I.: Mogućnost ojačanja cementnog kompozita vlaknima brnistre, *Građevinar*, 70(6), 2018, (487-495), 10.14256/JCE.2293.2017
- [12] Katović, D., Katović, A., Antonović, A.: Extraction Methods of Spanish Broom (*Spartium Junceum* L.), *Wood Industry/Drvna Industrija*, 62(4), 2011, (255-261), 10.5552/drind.2011.1112
- [13] Angelini, L. G., Lazzeri, A., Levita, G., Fontanelli, D., Bozzi, C.: Ramie (*Boehmeria nivea* (L.) Gaud.) and Spanish Broom (*Spartium junceum* L.) fibres for composite materials: agronomical aspects, morphology and mechanical properties, *Industrial Crops and Products*, 11(2-3), 2000, (145-161), 10.1016/S0926-6690(99)00059-X
- [14] Nekkaa, S., Guessoum, M., & Haddaoui, N.: Water absorption behavior and impact properties of spartium junceum fiber composites, *International Journal of Polymeric Materials*, 58(9), 2009, (468-481), 10.1080/00914030902936535
- [15] Juradin, S., Boko, I., Grubeša, I. N., Jozić, D., Mrakovčić, S.: Influence of harvesting time and maceration method of Spanish Broom (*Spartium junceum* L.) fibers on mechanical properties of reinforced cement mortar, *Construction and Building Materials*, 225, 2019, (243-255), 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.207

PRIMJENA BIOPEPELA U NOSIVOM SLOJU KOLNIKA

APPLICATION OF BIOASH IN PAVEMENT BASE LAYERS

Martina Zagvozda¹

(1) Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, mzagvozda@gfos.hr

Sažetak

U svijetu postoji sve veća tendencija na primjeni lokalnih i otpadnih materijala zadovoljavajućih svojstava prilikom izgradnje cesta, posebice nerazvrstanih ili cesta malog volumena prometa. U istočnoj Hrvatskoj se kao otpadni materijal sve više gomila pepeo, koji nastaje spaljivanjem biomase, ponajviše drvene, za proizvodnju energije. Svojstva drvnih biopepela upućuju na mogućnost zamjene tradicionalnog veziva ovim pepelom u mješavinama vezanim hidrauličkim vezivom. U ovom radu su ukratko prikazana ispitivanja i rezultati provedbe ispitivanja u sklopu doktorske disertacije kojoj je jedan od ciljeva bio odrediti učinak drvnog biopepela kao veziva lokalnog tla za izgradnju nosivih slojeva nerazvrstanih cesta.

Ključne riječi: biopepeo, nosivi sloj, alternativni materijal, hidrauličkim vezivom vezano tlo

Abstract

There is an increasing tendency in the world to apply local and waste materials of satisfactory properties in construction of roads, especially for unclassified or low volumes roads. In the eastern part of Croatia, a waste material that is being more and more accumulated is bioash, generated by combustion of mostly wood biomass for energy production. The properties of wood bioash indicate the possibility of replacing the traditional binder with this ash in hydraulically bound binder mixtures. In this paper, methods and results from doctoral thesis, which had the objectives to determine the effect of wood bioash as binder for local soil in construction of base courses for low volume roads, are briefly presented.

Keywords: bioash, base layer, alternative material, hydraulically bound soil

1. Uvod

Zahtjevi održivog razvoja potiču sve veću primjenu alternativnih materijala, prikladnih svojstava, u cjelokupnom građevinarstvu, pa tako i u cestogradnji. Jedan od načina primjene je i izvedba nosivih slojeva cesta od lokalnih i otpadnih materijala. Ovo je posebno prikladno pri izgradnji nerazvrstanih cesta s manjim volumenima prometa, u kojima su manji zahtjevi postavljeni na kolnik i ograničena su financijska sredstva za njihovu izvedbu. Izgradnjom kolničkih konstrukcija nerazvrstanih cesta od lokalno dostupnih materijala smanjuje se potreba za sve manje dostupnim kvalitetnim zrnatim materijalima. Kada su ti lokalni materijali i lokalno generirani otpadni materijal ili nusproizvod, djelomično se rješava i problem odlaganja otpadnog materijala. U cilju sve veće proizvodnje energije iz obnovljivih izvora prema Direktivi 2009/28/EC, u istočnoj Slavoniji posebice, generiraju se sve veće količine biopepela kao ostatka spaljivanja drvene biomase pri proizvodnji električne i toplinske energije. Kako na razini Hrvatske još nisu pronađeni prikladni načini recikliranja ovog pepela, kroz doktorsku disertaciju [1] su provedena istraživanja moguće primjene biopepela kao zamjene za tradicionalno vezivo pri stabilizaciji lokalnog tla za primjenu u nosivim slojevima.

2. Biopepeli

Biopepeo je kruti ostatak potpunog ili nepotpunog izgaranja organskog materijala u biomasi. Sastoji se od postojećih (dio organske strukture ili mineralne čestice dospjele u biomasu prilikom prikupljanja i obrade) i novoformiranih anorganskih tvari koje nastaju u procesu spaljivanja te često manjeg udjela nespaljene organske tvari, vlage i plinova [2]. Količine, kvaliteta, fizikalna i kemijska svojstva biopepela ovise o vrsti i spaljivanom dijelu biomase, sadržaju mineralnih nečistoća, lokaciji gdje je biomasa rasla, načinu prikupljanja i obrade biomase, tehnologiji i temperaturi spaljivanja [2]–[5]. Obično se razlikuju 3 frakcije pepela: pepeo ložišta, krupni i filterski leteći pepeo. Ovisno o frakciji čestice se mogu kretati od reda veličine nm pa sve do čestica koje imaju granulometriju pijeska ili finog šljunka, odnosno veličinu zrna do 6 ili 10 mm. Gustoće drvnih pepela obično su između 2,3–3,0 g/cm³, a prostorne mase variraju od 350 kg/m³ (leteći pepeli) do 950 kg/m³ (pepeli ložišta) [4]. Kemijski sastavi također bitno variraju prema vrsti biomase, a sastoje se od nutrienata koji su postali dio biomase tijekom rasta biljke. Bitan utjecaj na kemijski sastav imaju i načini spaljivanja i frakciji pepela. Pepeli drvene biomase imaju najveći sadržaj CaO, dok pepeli poljoprivrednih kultura (slama i rižine ljuske) obično imaju najveći udio SiO₂ i manji sadržaj teških metala, a u pepelima ljuski suncokreta, obično je i znatan sadržaj K₂O. Utjecaj spaljivanja i načina sakupljanja pepela posebno se očituje u teškim metalima, odnosno bitno se povećava od pepela ložišta prema finijim česticama filterskih pepela.

Zbog navedenih kemijskih i fizikalnih svojstava te činjenice da se u Hrvatskoj u kogeneracijama na biomasu spaljuje dominantno drvena biomasa, upravo su drveni biopepeli bili predmet istraživanja kroz doktorski rad. Utvrđena finoća čestica i kemijski sastav elektrofilterskog letećeg pepela upućivali su na to da bi ovim pepelom moglo djelomično ili potpuno zamijeniti tradicionalno vezivo – vapno.

3. Laboratorijska ispitivanja i rezultati

Potencijal primjene letećeg drvnog biopepela kao veziva u hidraulički vezanom tlu ispitano je na tri lokalna tla različitih svojstava plastičnosti: visoko (A), srednje (B) i nisko plastične gline (C). Mješavine su pripravljene po principu da se standardno vapno u ukupnim količinama od 3 i 5 % mijenjalo u inkrementima od 25% sa drvnim biopepelom. Na taj način utvrđen je utjecaj i samog vapna i samog pepela, ali je bilo moguće odrediti i optimalnu kombinaciju ova dva veziva. Ukupno je ispitano 30 različitih mješavina, 10 po svakoj vrsti tla.

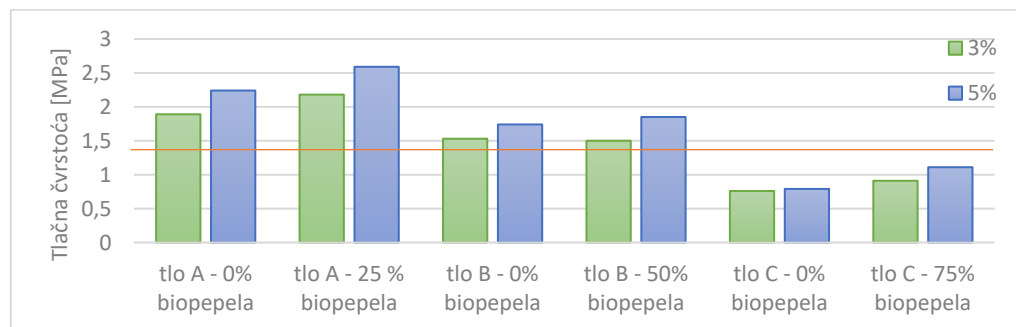
U Tablici 1 je prikazan popis svih prethodnih i glavnih laboratorijskih istraživanja provedenih u sklopu izrade doktorske disertacije. Prethodnim laboratorijskim ispitivanja definiran je utjecaj

drvnog biopepela i od njega sastavljenog kompleksnog veziva na modifikaciju svojstva tla poput smanjenja plastičnosti, promjene granulometrijskog sastava te učinka na svojstva zbijanja tog tla. Potom je uslijedila priprema uzoraka, propisana njega uzoraka te provedba glavnih ispitivanja.

Tablica 1. Provedena prethodna i glavna laboratorijskih ispitivanja

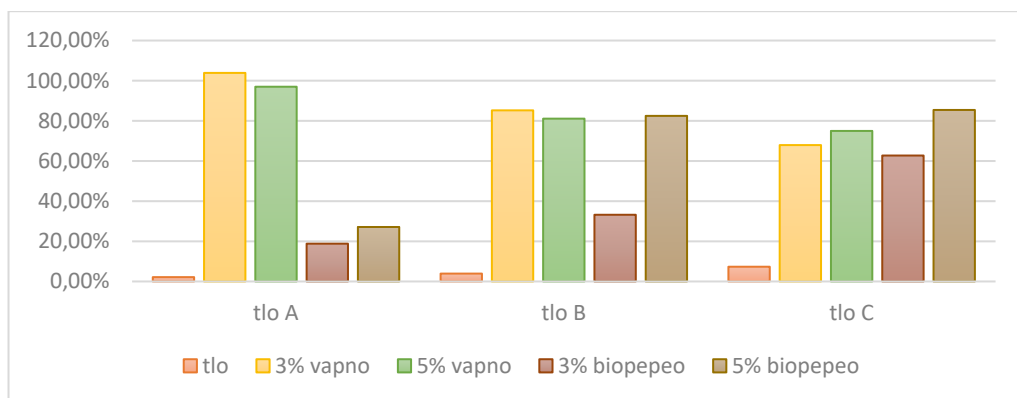
Prethodna ispitivanja	Glavna ispitivanja
Svojstva sastavnih materijala	Tlačna čvrstoća
pH vrijednost	Indirektna vlačna čvrstoća
Granice konzistencije	CBR
Granulometrija	Otpornost na smrzavanje
Optimalna vlažnost i maksimalna suha prostorna masa	Brzina prolaska ultrazvuka

Tlačne i indirektno vlačne čvrstoće te brzine prolaska ultrazvuka ispitane su na uzorcima koji su prethodno njegovani 7, 28 i 90 dana kako bi se utvrdio razvoj čvrstoća kroz vrijeme. Slikom 1. prikazane su izmjerene tlačne čvrstoće nakon 28 dana njege na mješavinama vezanim samo vapnom te mješavinama koje su sadržavale optimalni udio biopepela u vezivu. Kako je vidljivo, određenim udjelom zamjene vapna biopepelom moguće je poboljšati tlačne čvrstoće mješavina u odnosu na referentne mješavine samo s vapnom. Također, kako je navedeno na dijagramu na slici 1., optimalni udio zamjene se povećavao sa smanjenjem plastičnosti tla (tlo A visokoplastična glina, tlo C niskoplastična glina). Osim toga, i postignute tlačne čvrstoće su bile manje što je manja plastičnost osnovnog tla. Najmanje vrijednosti tlačnih čvrstoća postignute sa niskoplastičnom glinom C te taj set mješavina nije zadovoljivo normom propisane čvrstoće.



Slika 1. Usporedba tlačnih čvrstoća mješavina sa vapnom i sa optimalnim udjelom zamjenom vapna sa drvnim biopepelom za pojedino tlo nakon 28 dana njege

Slikom 2. prikazane su izmjerene CBR vrijednosti na samom tlu te na mješavinama koje su sadržavale ili čisto vapno ili čisti biopepeo. Indeks CBR-a mjeren je na mješavinama nakon što su 96 h bile potopljene pod vodom kako bi se dozvolilo i mjerilo linearno bubrenje. Kako je vidljivo i dodatkom samog biopepela može se znatno povećati nosivost u odnosu na onu koja je izmjerena na samom tlu. Kod mješavina s visokoplastičnom glinom A samim biopepelom postiže se znatno manja nosivost no kada se kao vezivo primjeni vapno. Dok se kod tala srednje i niske plastičnosti nosivost približna onoj koja se dobije sa vapnom može postići i samostalnom primjenom biopepela. Najveće izmjerene nosivosti za pojedini set mješavina postignute su na mješavinama koje su sadržavale kombinaciju vapna i biopepela, a udjel u kojem su dozirani za optimalne rezultate ovisi o svojstvima osnovnog tla.



Slika 2. CBR samih tala u usporedbi sa CBR-om stabilizacijskih mješavina vezanih 3% i 5% vapna te 3% i 5% biopepela

4. Zaključak

Biopepeli su relativno novi nusproizvod koji se trenutno tretira kao otpad, no koji ima potencijal biti korišten kao alternativni građevinski materijal. Kao rezultat Europske Direktive 2009/28/EC u Hrvatskoj u zadnjih nekoliko godina proizvodi se sve više ovog pepela te je potrebno pronaći načine za njihovu uporabu. Zbog svog kemijskog sastava i finoće čestica leteći drveni biopepeli mogu se potencijalno koristiti kao zamjena za tradicionalno vezivo – vapno prilikom stabilizacije lokalnog tla za izgradnju cesta. Kako je pokazano u radu, djelomičnom zamjenom vapna drvnim biopepelom moguće je postići podjednake ili veće vrijednosti tlačnih čvrstoća no što je zabilježeno na referentnim mješavinama. Primjenu u nosivim slojevima kolničkih konstrukcija zadovoljava velik dio mješavina sa osnovnim tлом A i B, dok mješavine sa niskoplastičnom glinom C ne zadovoljavaju postavljene uvjete. Osim na tlačnu čvrstoću, biopepeo ima efekt i na nosivost tla, mjerenu CBR-om. Višestruko poboljšanje CBR-a mješavina u odnosu na samo tlo zabilježeno je za sve mješavine, a najlošiji učinak samostalni biopepeo je imao po dodatku visokoplastičnom tlu A.

Literatura

- [1] Zagvozda, M.: Nosivi sloj kolničkih konstrukcija nerazvrstanih cesta s biopepelom kao vezivom, doktorska disertacija, University of Zagreb, 2018.
- [2] Vanhanen, H., Dahl, O., Joensuu, S.: Utilization of wood ash as a road construction material - Sustainable use of wood ashes, 2nd International Conference on Final Sinks, vol. 24, no. 6, 2013, pp. 457–465.
- [3] James, A. K., Thring, R. W., Helle, S., Ghuman, H. S.: Ash management review-applications of biomass bottom ash, *Energies*, vol. 5, no. 10, 2012, pp. 3856–3873, <https://doi.org/10.3390/en5103856>
- [4] Van Loo, S., Koppejan, J.: *The Handbook of Biomass Combustion and Co - firing*. London: Earthscan, 2015.
- [5] Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., Vassileva, C. G.: An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase-mineral and chemical composition and classification, *Fuel*, vol. 105, 2013, pp. 40–76, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.09.041>

PODMAZIVANJE TRČNICA - MJERA SMANJIVANJA VISOKE RAZINE BUKE USLIJED PROLASKA VOZILA KROZ KRIVINE MALIH POLUMJERA

RAIL LUBRICATION - MEASURE FOR REDUCING HIGH NOISE LEVEL DUE THE TRAM PASSING THROUGH CURVES OF SMALL RADIUS

Katarina Vranešić¹, Ivo Haladin¹, Stjepan Lakušić¹

(1) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, kvranevic@grad.hr, ihaladin@grad.hr, laki@grad.hr

Sažetak

Kretanjem tračničkog vozila kroz horizontalne krivine malog polumjera nastaje visokofrekventna buka ("cviljenje") uslijed trenja vijenca kotača o unutarnji rub tračnice. Kako bi se smanjila buka "cviljenja" danas su u uporabi različiti načini ručnog ili automatskog podmazivanja tračnica. U ovome je radu, u cilju analize učinkovitosti automatskog podmazivanja tračnice, provedena analiza dviju horizontalnih krivina malih polumjera, pri čemu je u jednoj krivini osigurano podmazivanje tračnica, dok u drugoj krivini to nije slučaj. S obzirom da su obje krivine izvedene u istom polumjeru te kroz krivine prolaze tramvajska vozila sličnih karakteristika i voze istom brzinom, mjerenjem razine buke te analizom rezultata utvrđena je učinkovitost podmazivanja tračnica na smanjivanje razine buke.

Ključne riječi: buka, cviljenje, podmazivanje tračnica, tramvajski kolosijek

Abstract

Passing of a tram vehicle through horizontal curves of small radius can generate high frequency noise (squealing noise) due to the friction of the wheel hub on the inside rim of the rail. In order to reduce this squalling noise, different methods of manual or automatic lubrication are in use today. In this paper, in order to analyse the efficiency of the automatic rail lubrication, noise measurements on two horizontal curves of small radius were performed. Rails are lubricated in one curve, while in other that is not the case. Since both curves are built in the same radius, trams that are passing through the curves have similar characteristics and they are driving with the same speed, analysing the results of noise measurements, the effect of the rail lubrication on reduction of noise levels has been determined.

Keywords: noise, squealing noise, rail lubricant, tram track

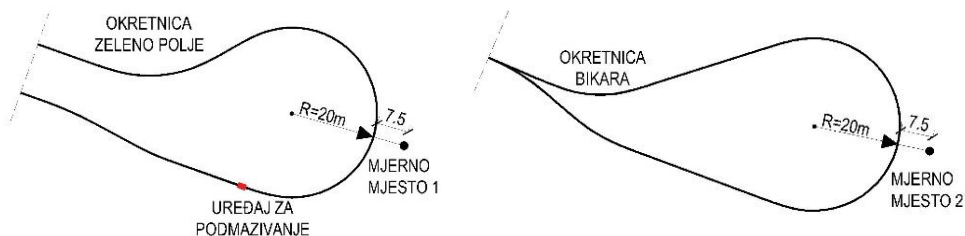
1. Uvod

Buka tračničkog prometa se može podijeliti kao buka uslijed rada motora i vuče tračničkih vozila, buka uslijed kotrljanja kotača po tračnici te aerodinamička buka. Buka uslijed kotrljanja kotača po tračnici je najdominantniji oblik buke kod brzina koje su prisutne na urbanim kolosijecima, pri čemu njena razina najviše ovisi o stanju površine tračnice (njenoj ravnosti) i površine kotača vozila [1]. U ovaj tip buke također spada i buka uslijed naleta kotača vozila na diskontinuitet na voznoj površini tračnice te cviljenje [1]. Cviljenje nastaje prilikom prolaska vozila kroz krivine malog radijusa ili prolaskom vozila kroz skretnice [2]. Prilikom prolaska vozila kroz krivinu dolazi do trenja vijenca kotača o unutarnji rub tračnice, što rezultira visokofrekventnom bukom "cviljenja" [2,3,4]. Frekvencije koje pri tome nastaju su u rasponu od 250 Hz do 10 kHz [3].

Kako bi se razine buke koje nastaju prolaskom tračničkih vozila svele na dopuštene vrijednosti, danas se sve više primjenjuje podmazivanje tračnica. Na taj se način, osim visokih razina buke, smanjuju i druge neželjene posljedice od kojih je najznačajnije istrošenje poprečnog presjeka tračnice te istrošenje vijenca kotača vozila. Podmazivanje voznog ruba tračnica može se izvoditi ručno ili automatski primjenom posebnih uređaja. Kod automatskog podmazivanja moguća su rješenja koja omogućuju podmazivanje ispusta vijenca kotača, podmazivanje voznih rubova tračnica pomoću uređaja koji se nalaze na vučnim sredstvima ili pomoću stabilnih postrojenja koja su ugrađena na tračnicama [5]. Kako bi kotač vozila mogao preuzeti mast koju je postrojenje ugrađeno na kolosijek prilikom prolaska osovinskog sklopa izbacilo, postrojenje je potrebno ugraditi na mjestu gdje su kotači u kontaktu s tračnicom, ali ne dolazi do bočnog istrošenja tračnice [1]. To se mjesto može odrediti vizualnim pregledom vanjske tračnice u krivini jer će tu vanjska tračnica biti sjajna, ali bez tragova bočnog istrošenja glave tračnice [1].

2. Učinkovitost podmazivanja tračnica u kružnim krivinama malog polumjera

U cilju analiza utjecaja podmazivanja tračnica na smanjivanje visokih razina buke nastalih prolaskom tramvajskog vozila kroz krivine malih polumjera, provedeno je mjerenje buke na dvije okretnice na tramvajskoj infrastrukturi u gradu Osijeku: okretnica Zeleno Polje te okretnica Bikara. Na okretnici Zeleno Polje vrši se automatsko podmazivanje tračnica, što nije slučaj na okretnici Bikara. S obzirom da su karakteristike vozila koja prometuju ovim dionicama slične te s obzirom da su obje okretnice izvedena u krivini istog polumjera $R = 20$ m, a ugrađene tračnice istog su tipa Ri60, moguće je odrediti učinak podmazivanja tračnica na smanjivanje razine buke. Razina buke mjerena je pomoću zvukomjera Bruel&Kjaer Hand-held Analyzer 2270, a mjerenje je provedeno u skladu sa normom za ispitivanje buke pri prolasku željezničkih vozila, HRN EN ISO 3095:2013 Akustika – Oprema za željeznice – Mjerenje buke koju proizvode željeznička vozila (ISO 3095:2013; EN ISO 3095:2013) [6]. Zvukomjer je prilikom mjerenja postavljen na visinu od 1,2 m te na udaljenost 7,5 m od osi kolosijeka (slika 1 i 2), a mjerenje je provedeno u večernjim satima kako bi se utjecaj vanjskih parametara na rezultate mjerenja sveo na minimum.



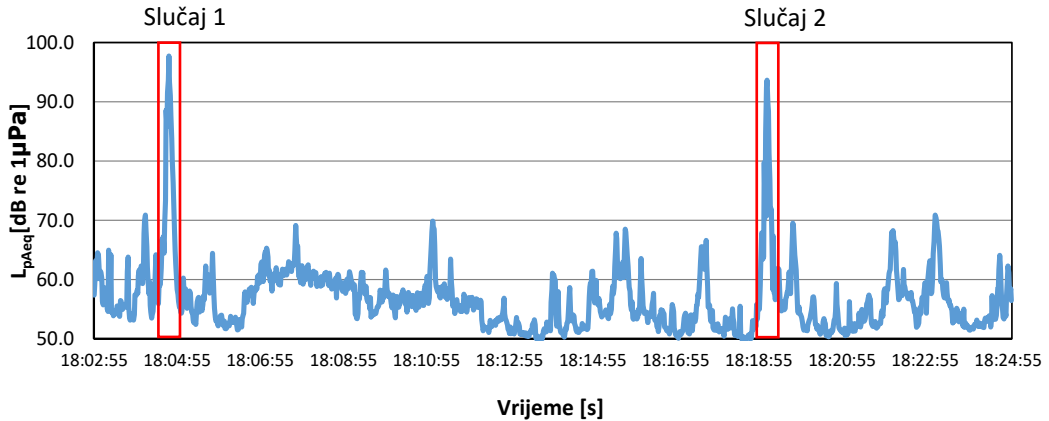
Slika 1. Položaj mjernog mjesta obzirom na okretnice, lijevo: Zeleno polje, desno: Bikara

Ukupna duljina tramvaja koji prometuje tramvajskom infrastrukturom u gradu Osijeku iznosi 14 m. Brzina kojom se vozila kreće kroz krivine na obje promatrane okretnice iznosi 12 km/h. Iz

navedenog proizlazi da vrijeme potrebno da vozilo cijelom svojom duljinom prođe kroz mjerno mjesto iznosi približno 4,2 sekunde. S obzirom da su rezultati snimanja bilježeni svaku sekundu, u daljnjoj analizi vrijeme prolaska vozila kroz mjerna mjesta zaokruženo je na 4 sekunde.

2.1. Tramvajska okretnica bez ugrađenih mazalica – mjerno mjesto 1 (MM1)

Na okretnici Bikara (MM1) uređaji za podmazivanje tračnica nisu ugrađeni. Rezultati snimanja razine buke na ovom mjestu grafički su prikazani na slici 2, pri čemu uski, šiljasti vrhovi odgovaraju razini buke koja je nastala prolaskom tramvajskog vozila. Kako je vidljivo na slici 2, okolna razina buke iznosi oko 60 dB, a prolaskom tračničkog vozila razina buke kreće se i do maksimalnih 97 dB, što predstavlja povećanje od 37 dB [2].

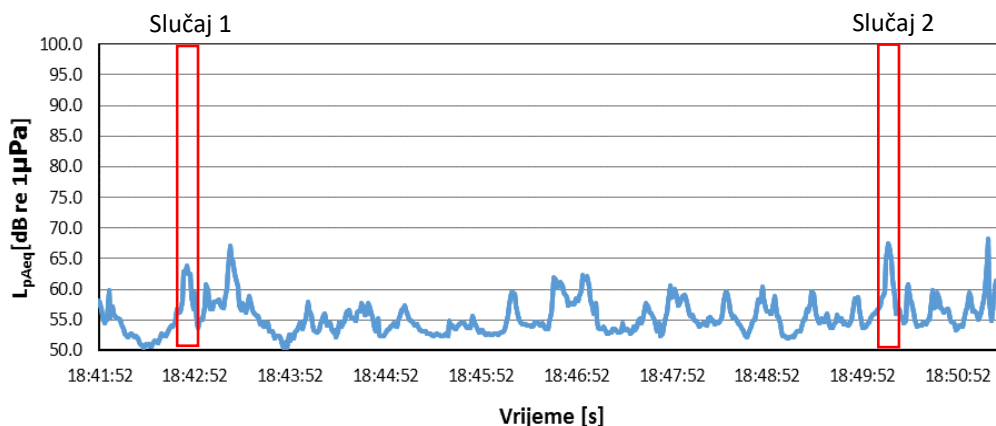


Slika 2. Prikaz izmjerenih razina buke na okretnici Bikara (bez podmazivanja)

Provedena je detaljnija analiza dva slučaja označena na slici 2 koji odgovaraju prolasku tramvajskih vozila (slučaj 1 – prolazak tramvajskog vozila T3-0610, slučaj 2 – prolazak tramvajskog vozila T3-0607). Za vremenski period od 4 sekunde analizirane su zabilježene ekvivalentne razine buke iz čega je izračunana srednja ekvivalentna razine buke koja prilikom prolaska tramvaja T3-0610 pored mjernog mjesta 1 iznosi: $L_{A,eq} = 94,64$ dB, a prilikom prolaska tramvaja T3-0607 iznosi: $L_{A,eq} = 91,54$ dB.

2.2. Tramvajska okretnica s ugrađenim uređajima za automatsko podmazivanje tračnica – mjerno mjesto 2 (MM2)

Na okretnici Zeleno polje (MM 2) ugrađeni su uređaji kojima se ostvaruje podmazivanje tračnica prilikom prolaska vozila. Kako je vidljivo na slici 1a, uređaj je ugrađen na početku kružne krivine. Razina buke koju stvara tramvaj prilikom prolaska kroz okretnicu nije puno veća od okolne razine buke (slika 3) kao što je to slučaj na mjernom mjestu 1. Iz navedenog se može zaključiti da se ugradnjom automatskih mazalica znatno smanjuje razina buke koju stvara vozilo prolaskom kroz krivinu malog radijusa.



Slika 3. Prikaz izmjerenih razina buke na okretnici Zeleno polje (sa podmazivanjem)

Detaljnije su analizirana dva slučaja označena na slici 3 koji odgovaraju prolasku tramvajskih vozila (slučaj 1 – prolazak tramvajskog vozila T3-0601, slučaj 2 – prolazak tramvajskog vozila T3-0604). Srednja ekvivalentna razine buke zabilježena pri prolasku tramvajskog vozila T3-0601 kroz mjesto 2 iznosi $L_{A,eq} = 63,03$ dB, a srednja ekvivalentna razina buke zabilježena pri prolasku tramvajskog vozila T3-0604 iznosi: $L_{A,eq} = 65,70$ dB.

3. Zaključak

U cilju određivanja učinkovitosti podmazivanja tračnica na smanjivanje razine buke, provedena je analiza rezultata mjerenja buke prilikom prolaska tramvajskog vozila kroz krivine malog polumjera na dvije lokacije. Na jednoj promatranoj lokaciji osigurano je automatsko podmazivanje tračnice, dok na drugoj to nije slučaj. S obzirom da su geometrijske karakteristike promatranih krivina iste te da kroz obje krivine prometuju tramvajska vozila istih karakteristika te jednake brzine, analizom izmjerenih podataka moguće je odrediti razliku u razinama buke na promatranim lokacijama. Utvrđeno je da na krivini na kojoj je osigurano podmazivanje tračnice ne dolazi do značajnijeg povećavanja buke, dok je u krivini u kojoj podmazivanje nije osigurano zabilježena buka i do 30 dB veća od okolne. Osiguravanjem podmazivanja tračnica uspješno je smanjena visokofrekventna buka ("cviljenje"), čime ova mjera predstavlja dobro rješenje smanjivanja visokih razina buke koje će se pojaviti u okretnicama te svim dijelovima trase gdje se ne može izbjeći izvođenje horizontalnih krivina malog polumjera.

Literatura

- [1] Panulinova, E., Harabinová, S., Argalášová, L.: Tram squealing noise and its impact on human health, *Noise Health*, 18, 2016, 329–337, doi: 10.4103/1463-1741.195799
- [2] De Beer, F.G., Janssens, M. H. A., Kooijman, P.: Squeal noise of rail-bound vehicles influenced by lateral contact position, *Journal of Sound and Vibration*, 267, 2003, 497–507, doi: 10.1016/S0022-460X(03)00710-7
- [3] Garg, N., Sharma, O.: Noise emissions of transit trains at curvature due to track lubrication, *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, 48, 2010, 881–885
- [4] Lakušić, S. i dr.: Analiza stanja tramvajskog kolosijeka na mreži GPP-a Osijek, elaborat, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2016
- [5] Lakušić, S.: Plan i program rada na pokusnoj dionici za električne tračničke mazalice proizvođača HY-POWER
- [6] HRN EN ISO 3095:2013: Oprema za željeznice - Akustika - Mjerenje buke koju proizvode željeznička vozila

MODELIRANJE PROSTORNOG SUSTAVA ZA PODRŠKU ODLUČIVANJU U PLANIRANJU URBANE KOMASACIJE

MODELLING SPATIAL DECISION SUPPORT SYSTEM TO PLANNING OF URBAN LAND CONSOLIDATION

Jelena Kilić¹

(1) Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Sveučilište u Splitu, jkilić@gradst.hr

Sažetak

U ovom radu su prikazani doprinosi doktorske disertacije autorice. Disertacijom je predložen jedinstveni prostorni sustav za podršku odlučivanju u planiranju urbane komasacije (PSPO PUK), koji je ujedno i glavni doprinos istraživanja. Na temelju dosadašnjih istraživanja predložene su okvirne odrednice postupaka urbane komasacije, kao i postupaka nadjeljivanja i participativnog pristupa. Oblikovan je i funkcionalno definiran PSPO PUK te su opisani njegovi ključni elementi: baza podataka, baza modela i ekspertni sustav. Definirani su i validirani njemu podržavajući modeli bazirani na višekriterijalnom pristupu uz korištenje metoda PROMETHEE, AHP, SAW, GAIA i ES. Glavni doprinosom se unaprjeđuju postupci planiranja i odlučivanja u rješavanju nestrukturiranih zadataka vezanih uz provedbu urbane komasacije na efikasan, kvalitetan i sistematičan način. Predloženi model se validirao na području realizacije velikog javnog projekta Kampusu Sveučilišta u Splitu.

Ključne riječi: prostorni sustav za podršku odlučivanju, urbana komasacija, višekriterijalne metode, ekspertni sustavi

Abstract

This paper presents the contributions of the author's doctoral dissertation. The dissertation proposed a unique spatial decision support system in planning urban consolidation (SDSS PUC), which is also a main research contribution. Based on previous research, the framework of the urban consolidation methods as well as the allocation procedure and the participatory approach have been proposed. The SDSS PUC has been designed and functionally defined, and its key elements have been described: database, model base and expert system. Its supporting models based on a multicriteria approach using PROMETHEE, AHP, SAW, GAIA methods and ES have been defined and validated. The main contribution is to improve the planning and decision-making procedures in solving unstructured tasks related to the implementation of urban consolidation in an efficient, quality and systematic way. The proposed model was validated in the field of realization of a large public project of the University of Split Campus.

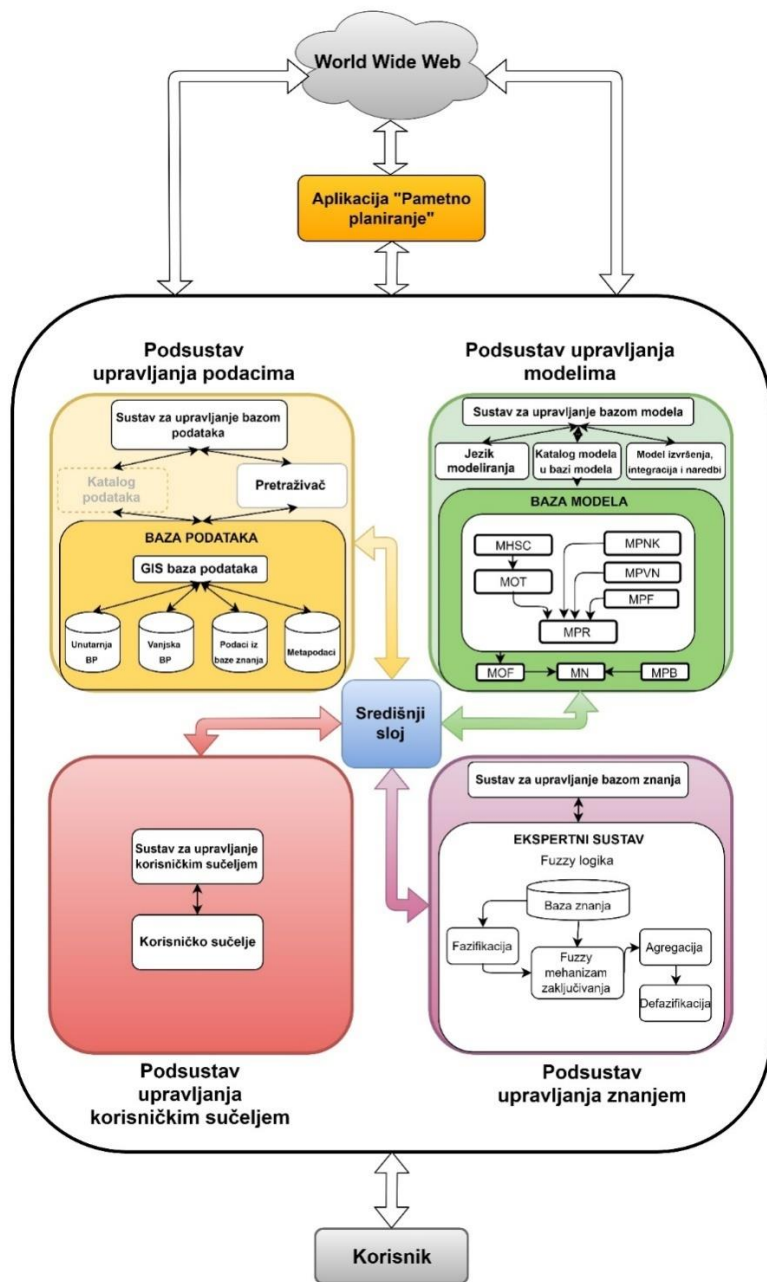
Keywords: spatial decision support system, urban consolidation, multi-criteria methods, expert systems

1. Uvod

Strateško upravljanje urbanim prostorom započinje procesom planiranja na koje se ne može gledati kao konačnu, zaokruženu cjelinu, već kao na iterativan postupak koji se proteže i u samu fazu provedbe, odnosno realizacije planova. Velika količina podataka, utjecajnih elemenata, uzimanje u obzir sadašnjih i predviđanje budućih prostornih i društvenih potreba kao i potreba uključivanja svih relevantnih dionika u procese planiranja dovela je do primjene integralnog pristupa kako u upravljanju projektom, tako i u fazi njegovog planiranja. Svrha integralnog pristupa u planiranju je modeliranje sustava kojim će se sve navedeno uklopiti u cjelinu, a međusobno djelovanje navedenih elementa detaljno analizirati i postaviti kao temelj definiranja pristupa upravljanja. Primjena sustava kojemu je osnovna zadaća pomoć u integriranju svih navedenih zahtjeva može se provesti i u fazi kada su prostorni planovi već doneseni, no nije jasno utvrđen način niti dinamika njihove provedbe. Jednako tako, procesi planiranja provedbe prostornih planova te kasnije i sami procesi provedbe, posebno u slučaju velikih javnih projekata, ne mogu se promatrati kao zasebne cjeline već veze između njih trebaju biti reverzibilne, a sam postupak iterativan, što rezultira dinamičkim planom projektnih aktivnosti. Izgradnja velikih javnih projekata kroz duži vremenski period upućuje na faznost u njihovoj realizaciji. Planiranjem faza realizacije projekata utvrđuje se vremenska dimenzija u procesu upravljanja, pri čemu je vrlo važno utvrditi sve relevantne utjecajne kriterije između različitih projektnih rješenja. Uklapanjem prioritarnih varijantnih rješenja u postojeće prostorne planove kao i mogućnostima izmjena i dopuna planova postiže se kvalitetnije upravljanje urbanim prostornim jedinicama, ali i urbanim sustavom u cjelini. Sve navedeno se uklapa u procese urbanističkog planiranja, a u svrhu njihove provedbe odabrana je metoda urbane komasacije kao alat urbanog razvoja prostora. Podrška u procesima urbanističkog planiranja je prepoznata kao područje sa širokim mogućnostima istraživanja posebno zbog velikog broja raznovrsnih podataka kao i dionika na koje donesene odluke utječu. Participativan, objektivni i transparentan pristup se postiže razvojem novog prostornog sustava za podršku odlučivanju (PSPO) kojim će se navedeni procesi automatizirati uz istovremenu mogućnost lake adaptacije na iste ili slične projektne zadatke [2].

2. Arhitektura prostornog sustava za podršku odlučivanju u planiranju urbane komasacije

Glavni cilj doktorske disertacije - modeliranje arhitekture PSPO PUK (koji obuhvaća ciljeve i procese vezane uz razvoj baze podataka, baze modela i ES-a s pripadajućom bazom znanja s kojima se preko hijerarhijske strukture odlučivanja provodi proces odlučivanja u planiranju urbane komasacije) s definiranjem funkcionalnih odnosa njenih dijelova (podsustava, ali i njihovih elemenata) iskazan je na slici 1. Ovakvo modelirana arhitektura PSPO PUK je primjenjiva prilikom planiranja provedbe urbane obnove (odabranog postupka urbane komasacije) u cilju realizacije velikog javnog projekta. Ista ima mogućnost lake prilagodbe i ostalim specifičnim modelima urbane komasacije, kao i drugim metodama prostornog urbanističkog uređenja. Navedene prilagodbe zahtijevale bi nadopunu baze modela i podataka novim koji odgovaraju na identificirane potrebe, a iskazani PSPO PUK kao otvoreni sustav lako bi se istima nadopunio. Fokus disertacije kao iskaza provedenog istraživanja je stavljen na oblikovanje dijelova prethodno navedenih podsustava, a to su GIS baza podataka i definiranje njenih glavnih karakteristika/podataka unutar podsustava za upravljanje podacima, baza modela sa svim njenim modelima u okviru podsustava za upravljanje modelima i ES-a te njegove baze znanja koji se nalaze unutar podsustava za upravljanje znanjem. Upravo ovi dijelovi PSPO PUK predstavljaju istraživački doprinos te su detaljno objašnjeni u narednim potpoglavljima i to po podsustavima u koje pripadaju [2].



Slika 1. Arhitektura PSPO-a u planiranju urbane komasacije [2]

2.1. Podsustav upravljanja podacima

Podsustav upravljanja podacima se sastoji od četiri osnovna elementa: sustava za upravljanje bazom podataka, GIS baze podataka, kataloga podataka u bazi podataka i pretraživača. GIS baza podataka daje mogućnost manipulacije sirovim, izvornim i izvedenim podacima u cilju dobivanja novih informacija potrebnih za provedbu modela u bazi modela. Baza podataka sadrži unutarnju bazu podataka, vanjsku bazu podataka, podatke iz baze znanja te definirane metapodatke o kreiranim i prikupljenim podacima. Unutarnja baza podataka obuhvaća podatke o česticama zemljišta na području provedbe velikog javnog projekta, podatke o česticama zemljišta unutar fonda za urbanu komasaciju i preferencije privatnih vlasnika čestica zemljišta. Težište istraživanja ove doktorske disertacije je stavljeno na prikupljanju podataka o česticama zemljišta na području provedbe velikog javnog projekta. Ti podaci obuhvaćaju podatke investitora o projektu i subprojektima za realizaciju velikog javnog projekta. Jednako tako, procesima strateške razine odlučivanja određeni su ciljevi, podciljevi, kriteriji i ograničenjau planiranju provedbe urbane komasacije, a predstavljaju osnovu za prikupljanje podataka na operativnoj razini odlučivanja o subprojektima velikog javnog projekta i česticama zemljišta na području provedbe projekta (nagib, pristup cesti, orijentacija, udaljenost od glavnih prometnica, ...). Unutarnja baza podataka čestica zemljišta na području provedbe projekta obuhvaća i podatke dobivene djelovanjem određenog modela u bazi modela, kao i podatke u obliku povratnih informacija nakon djelovanja određene odluke. S obzirom da je za provedbu urbane obnove, kao posebnog oblika urbane komasacije, poželjno definirati fond za njenu provedbu koji obuhvaća novčani i zemljišni fond, unutarnja baza podataka treba sadržavati osim detaljnih podataka o česticama zemljišta na području provedbe projekta, također i podatke o česticama zemljišta u vlasništvu investitora izvan područja projekta, a u svrhu definiranja modela nadjeljivanja privatnih vlasnika čestica. Aplikacijom „Pametno planiranje“ prikupljaju se preferencije privatnih vlasnika za definiciju kriterija u hijerarhijskoj strukturi ciljeva kao i definiciju modela nadjeljivanja. Preferencije se također prikupljaju individualnim i grupnim razgovorima s privatnim vlasnicima, a pohranjuju se u unutarnju bazu podataka. Za prikupljanje podataka o česticama zemljišta potrebno je koristiti i vanjske baze podataka koje se odnose na baze podataka katastra (u nadležnosti Državne geodetske uprave) i zemljišne knjige (u nadležnosti Ministarstva pravosuđa i Državne geodetske uprave) kojima se dobiju podaci o površini, vlasništvu i namjeni čestica te informacija o usklađenosti podataka katastra i zemljišne knjige za svaku pojedinu česticu. Dio baze podataka su i podaci iz baze znanja na osnovu kojih je treniran i testiran ES [2].

2.2. Podsustav upravljanja modelima

Podsustav upravljanja modelima se sastoji od sljedećih elemenata: sustava za upravljanje bazom modela, baze modela, jezika modeliranja, kataloga modela u bazi modela te modela izvršenja, integracija i naredbi [1]. S obzirom da je planiranje provedbe urbane komasacije strateško planiranje koje se odnosi na razinu rješavanja nestrukturiranih zadataka, za njegovu učinkovitu provedbu je potrebno kreirati vlastite modele više razine. Svi modeli su objedinjeni unutar PSPO PUK s točno definiranim vezama između njih. Interakcije između modela su definirane na način da je realizacija jednog modela polazišna točka za realizaciju drugog modela, točnije da je za definiciju strateškog plana provedbe urbane komasacije potrebna uspješna provedba podržavajućih modela. Model prioritnog rangiranja čestica (MPR) obuhvaća model hijerarhijske strukture ciljeva (MHSC) koji se sastoji od glavnog cilja, dvije razine podciljeva i kriterija te model određivanja težina kriterija (MOT) na svim razinama hijerarhijske strukture korištenjem AHP metode. MPR koristi zadnju razinu hijerarhijske strukture ciljeva, odnosno definirane kriterije za potrebe usporedbe i prioritnog rangiranja čestica korištenjem metoda PROMETHEE I, II i GAIA. Za definiciju kriterija se koriste model procjene namjenske korisnosti (MPNK), model procjene vrijednosti nekretnina (MPVN) koji se odnosi na

procjenu nekretnina prije postupka urbane komasacije i model procjene fragmentacije čestica zemljišta (MPF). MPVN je definiran poredbenom metodom pojedinačne procjene vrijednosti nekretnina, dok je za definiciju MPF korištena metoda jednostavnog zbrajanja težina. Težine u MPF su određene AHP metodom. S obzirom da se realizacija projekta odvija u fazama, sukladno tome se i provedba urbane komasacije odvija u više faza, a procesi pripremnih postupaka II. faze (kreiranje i ažuriranje GIS baze podataka), provedbenih postupaka planiranja urbane komasacije i postupaka nadjeljivanja se ponavljaju do trenutka kada su sve čestice zemljišta obuhvaćene urbanom komasacijom, a što je regulirano modelom određivanja faza provedbe urbane komasacije (MOF) za čiju provedbu se koristi PROMETHEE V metoda. Svi spomenuti modeli koriste unutarnju i vanjsku bazu podataka za evaluaciju čestica zemljišta. Već spomenuta četvrta, zadnja faza planiranja provedbe urbane komasacije obuhvaća radnje nadjeljivanja objedinjene u model nadjeljivanja (MN) koji obuhvaća model procjene boniteta čestica zemljišta (MPB), MPVN i preferencije privatnih vlasnika čestica. MPB je realiziran kao ES baziran na sustavu neizrazite (fuzzy) logike unutar komponente znanja. MN, a sukladno tome i njemu podržavajući model MPB koriste unutarnju, vanjsku bazu podataka i bazu znanja [2].

2.3. Podsustav upravljanja znanjem

Podsustav upravljanja znanjem se sastoji od sustava za upravljanja bazom znanja te ekspertnog sustava [1]. Ponekad su za rješavanje polustrukturiranih ili nestrukturiranih zadataka potrebne informacije koje se ne mogu dobiti GIS prostornim analizama ili korištenjem matematičkih modela unutar baze modela već su potrebna dodatna stručna znanja koja posjeduju isključivo eksperti u pojedinom području istraživanja. S obzirom na rečeno, javila se potreba definicije ES-a za realizaciju modela procjene boniteta čestica zemljišta (MPB). ES pruža mogućnost modeliranja ekspertnog razmišljanja u formi niza specifičnih pravila, a u svrsi pružanja podrške korisnicima (koji nisu stručnjaci u području istraživanja) pri rješavanju polustrukturiranih i nestrukturiranih zadataka i donošenju taktičkih ili strateških odluka. MPB je dio baze modela, a koristi se za određivanje jedne od podloga za definiciju prioriteta pri izboru budućih čestica zemljišta u MN. Prema prirodi problema kao i postojećim principima vrednovanja čestica zemljišta kod provedbe kako poljoprivredne tako i urbane komasacije, za smanjenje nesigurnosti prilikom procjene temeljene na znanju skupine eksperata odabrana je metoda neizrazite (fuzzy) logike kojom se strogo pridjeljivanje čestice zemljišta samo jednoj numeričkoj vrijednosti, odnosno jednoj vrijednosti lingvističke varijable zamjenjuje s udjelima pripadnosti. Ovim postupkom se smanjuje nepreciznost prilikom definiranja oštrih granica razreda koje se najčešće koriste kod automatiziranja procesa obrade velike količine podataka. Jednako tako, primjenom ES-a u cilju ocjene prvotnih čestica zemljišta, a za potrebe nadjeljivanja, postiže se veća objektivnost i transparentnost postupka, čime se stvara kvalitetnija podloga za pregovaranje s privatnim vlasnicima. Za potrebe provedbe ES-a se koriste podaci unutarnje i vanjske baze podataka, a rješenja fuzzy sustava se natrag pohranjuju u poseban direktorij baze podataka nazvan podaci iz baze znanja [2].

Interakcija PSPO PUK s okolinom je ostvarena preko podsustava za upravljanje korisničkim sučeljem i aplikacije „Pametno planiranje“. Potrebno je naglasiti da su obje komponente u disertaciji razložene samo na teorijskoj razini.

3. Zaključak

Urbana komasacija u funkciji potpune urbane obnove pojedinog područja je kompleksan i nestrukturiran problem kojeg karakterizira velik broj konfliktnih ciljeva i kriterija, brojni često neusporedivi podaci i informacije, velik broj po stavovima različitih dionika kao i ograničeni financijski resursi vezani uz zadanu problematiku u realizaciji velikog javnog projekta. Analiza problema istraživanja je rezultirala primjenom integralnog pristupa razvojem jedinstvenog PSPO-a čija je svrha unaprjeđenje planiranja i donošenja odluka u provedbi urbane komasacije. Realizacija sustava je ostvarena kroz četiri komponente s detaljno utvrđenim tokovima informacija između njihovih pojedinih elemenata. Uključenost eksperata u procese izgradnje elemenata komponenata PSPO-a je definirana njihovim stručnim znanjem o datom problemu. Istraživanje se baziralo na izgradnji elemenata baze podataka, baze modela i ES-a s pripadajućom bazom znanja unutar kojih se obavljaju ključne funkcije od prikupljanja podataka do izgradnje podržavajućih modela uklopljenih u novooblikovani PSPO PUK. Sukladno navedenom, procesi planiranja su podijeljeni prema hijerarhijskim razinama kojima je definiran tok donošenja odluka, od strukturiranog do izrazito nestrukturiranog odlučivanja, koji je u ovom slučaju vezan uz strateški cilj realizacije Kampusa Sveučilišta u Splitu. Jednako tako, bitan faktor je i dinamičnost samog sustava koji zahtijeva iterativan postupak u izgradnji pojedinih elemenata, ali i cikličan proces planiranja u svrhu utvrđivanja faza provedbe. Sve navedeno je uklopljeno u jedinstveni sustav podrške planiranju koji je teorijski definiran i ispitan na stvarnom primjeru. Može se zaključiti da se novooblikovani PSPO pokazao uspješnim u rješavanju nestrukturiranih zadaća vezanih uz procese planiranja provedbe urbane komasacije. Izgradnjom elemenata komponenata sustava, identificiranjem svih relevantnih podataka potrebnih za provedbu istraživanja, okupljanjem i organiziranjem skupina dionika, validacijom PSPO PUK i svih njemu podržavajućih modela te uključivanjem stručnjaka i znanstvenika u procese izgradnje svih modela s posebnim naglaskom na izgradnju ES-a, predložena je efikasna metodologija rješavanja složenih postupaka prostornog planiranja u cilju donošenja kvalitetnih strateških odluka. Detaljno utvrđen postupak planiranja provedbe urbane komasacije u svrhu realizacije velikog javnog projekta te provjera njegove funkcionalnosti na primjeru realizacije projekta Kampusu Sveučilišta u Splitu omogućuje organiziran i sistematičan pristup rješavanju budućih prostornih zahtjeva vezanih uz urbanističko planiranje. Predložene baze podataka, baze modela, s posebnim naglaskom na MHSC, kao i ES-a i njemu pripadajuće baze znanja, uz jednostavnu mogućnost modifikacije, lako se mogu prilagoditi rješavanju novih specifičnih prostornih zadaća. Na kraju se može zaključiti da je temeljem predloženog PSPO PUK kao i njegove validacije na primjeru projekta Kampusu Sveučilišta u Splitu moguće unaprijediti procese odlučivanja i planiranja u postupku urbane komasacije, s posebnim naglaskom na njenu korisnost u cilju realizacije velikih javnih projekata [2].

Literatura

- [1] Turban, E., Aronson, J. E., Liang, T. P., McCarthy, R. V.: Decision Support Systems and Intelligent Systems. Prentice Hall. N.J., 2007.
- [2] Kilić, J.: Modeliranje prostornog sustava za podršku odlučivanju u planiranju urbane komasacije. Doktorska disertacija. Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 2019.

VIDEO ANALIZA PRAĆENJA KRETANJA I RADA KAMIONA KIPERA NA GRADILIŠTU

VIDEO ANALYSIS OF TRACKING THE TIPPER TRUCK WHILE DRIVING AND OPERATING ON THE CONSTRUCTION SITE

Martina Šopić¹, Mladen Vukomanović²

(1) Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, martina.sopic@uniri.hr

(2) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, mvukoman@grad.hr

Sažetak

Rad daje kratak pregled prijedloga metodologije za praćenje i kontrolu kretanja i rada kamiona kiperera na gradilištu, prilikom izvođenja zemljanih radova. Metodologija uključuje korištenje videokamere za snimanje kretanja i rada kamiona kiperera na gradilištu te analizu snimljenih video zapisa primjenom naprednog računalnog programa (softvera). Primjena metodologije će se prikazati na jednom, trenutno aktivnom, gradilištu u Rijeci. U radu su istaknuti rezultati video analize koji na jasan i pregledan način daju uvid u jedan vremenski ciklus kamiona kiperera na promatranom gradilištu u Rijeci. Dodatne analize nekoliko povezanih video zapisa za promatrano gradilište, u svrhu dobivanja karakterističnog vremenskog ciklusa, mogu služiti kao brzo dostupne i pregledne podloge za procjenu stvarne produktivnosti i/ili izračuna mjernog učinka kamiona kiperera, te za kontrolu izvođenja radova u smislu je li trajanje neke radne operacije (iznenada) (ne)opravdano dugo.

Ključne riječi: metodologija, video analiza, kamion kiper, produktivnost

Abstract

The paper gives a brief overview of the proposed methodology for tracking and monitoring the movement and operation of tipper trucks at a construction site, during the earthworks. The methodology involves the use of a video camera, to record the movement and operation of tipper trucks on site, and video analysis of recorded videos, using an advanced computer program (software). The application of the methodology will be demonstrated for one, currently active, construction site in Rijeka. The paper highlights the results of video analysis, for observed construction site in Rijeka, that provide clearly and transparently insight for the single tipper truck cycle time. Additional analysis of several similar videos for observed site, can serve as a basis for assessment of actual productivity of tipper truck, and for controlling the performance of the works, in terms of whether the work operation duration is (suddenly) justified or unjustified long.

Keywords: methodology, video analysis, tipper truck, productivity

1. Uvod

Audiovizualne tehnologije zasnivaju se na mogućnostima zvučnog i vizualnog prijema i prijenosa informacija. Primjer alata audiovizualne tehnologije je videokamera. Videokamera ima elektronički uređaj za snimanje, obradu i spremanje pokretnih slika u obliku video zapisa. Video zapis je audiovizualno sredstvo koje ima mogućnost prikaza zvučne i vizualne reprodukcije zbiljskih okolnosti i prilika u kojima se neki predmet opažanja nalazio u vremenu snimanja. Video analiza je raščlamba neke složene cjeline, sadržane u video zapisu, na sastavne dijelove te cjeline, radi nekog proučavanja. Varijacije audiovizualnih tehnologija, ovisno o korištenim tehnologijama, mogu predstavljati vizualne tehnologije (vizualna sredstva za rješavanje nekog problema ili potrebe), vizualno-osjetilne tehnologije (vizualna sredstva u kombinaciji s mjernim, osjetilnim, sredstvima za rješavanje nekog problema ili potrebe) i slično.

Izvođenje zemljanih radova predstavlja zahtjevan zadatak pri planiranju izvođenja radova zbog prisutne upitne točnosti procjena kategorija tla i/ili stijene te izražene osjetljivosti na nepovoljne vremenske neprilike. U takvim uvjetima teško je (ili nemoguće) unaprijed točno predvidjeti i isplanirati produktivnost građevinskih strojeva, kao i potrebno vrijeme za izvođenje radova te trošak. Stoga, mjerenje stvarne produktivnosti građevinskih strojeva na gradilištu, prilikom neposrednog izvođenja radova, pruža moguću izlaz iz labirinta krivih, netočnih i subjektivnih procjena [1]. U svrhu mjerenja stvarne produktivnosti građevinskih strojeva na gradilištu, istraživači koriste razne metode i sredstva, posebno predstavnike, obećavajućih i brzorastućih, područja bežičnih tehnologija, vizualnih tehnologija, vizualno-osjetilnih tehnologija, informacijsko-komunikacijskih tehnologija i sl. Međutim, dosadašnja istraživanja ukazuju na nedostatke i ograničenja u primjeni takvih tehnologija i potrebna su daljnja istraživanja njihovih značajnih potencijala.

Ovaj rad daje kratak pregled prijedloga metodologije za praćenje i kontrolu kretanja i rada kamiona kiperu na gradilištu, prilikom izvođenja zemljanih radova. Metodologija uključuje korištenje videokamere za snimanje kretanja i rada kamiona kiperu na gradilištu te analizu snimljenih video zapisa primjenom naprednog računalnog programa (softvera). Općenito, metodologija ima poseban naglasak na utovar materijala u kamione kiperu i trebala bi, prvenstveno, služiti za procjenu stvarne produktivnosti bagera prilikom utovara materijala u kamione kiperu. Nadalje, u situacijama s više aktiviranih kamiona kiperu za utovar i odvoz materijala, ideja metodologije je detektiranje većeg ili manjeg broja kamiona kiperu na gradilištu za vrijeme utovara materijala, od stvarno potrebnog broja, te usporedne analize ukupnog broja utovarenih lopati, ovisno o zapreminama sanduka kamiona kiperu, odnosno usporedne analize produktivnosti. Međutim, u ovom radu, budući da je na jednom promatranom gradilištu u Rijeci, radi manje količine materijala za utovar i odvoz, bio aktiviran samo jedan kamion kiper, kao i situacije da je deponija za istovar materijala, također, na samom gradilištu, metodologija, pritom, može poslužiti za dobivanje trajanja jednog vremenskog ciklusa kamiona kiperu na gradilištu. U radu će se prikazati rezultati video analize koji na jasan i pregledan način daju uvid u jedan vremenski ciklus kamiona kiperu na gradilištu. Dodatne analize nekoliko povezanih video zapisa za promatrano gradilište, u svrhu dobivanja karakterističnog vremenskog ciklusa, mogu služiti kao brzo dostupne i pregledne podloge za procjenu stvarne produktivnosti i/ili izračuna mjernog učinka kamiona kiperu, te za kontrolu izvođenja radova.

2. Pregled literature

Praćenje progressa izvedbe zemljanih radova uz točnu procjenu produktivnosti građevinskih strojeva omogućuje detaljan uvid u tijek izvedbe, ranu detekciju slabe produktivnosti, kao i svih ostalih mogućih nedostataka, povratnu informaciju ispravnosti donesenih odluka te precizniji iskaz potrebnog vremena i troška aktivnosti [2]. Građevinski strojevi (poput utovarivača, bagera i kamiona kiperu) imaju presudnu ulogu prilikom izvođenja zemljanih radova [3]. Vizualne tehnologije predstavljaju odličan izbor za praćenje zemljanih radova u stvarnom vremenu zbog općenitih karakteristika zemljanih radova, poput pružanja prostranog i jasnog

vidika na izvođenje radove te relativno brzog uočavanja strojeva [4]. Video zapisi izvođenja zemljanih radova pružaju razumljive, zbiljske, podatke koji se mogu upotrijebiti za razne usporedbe i analize izvođenja [5]. Autori Bügler i dr. [6] su kombinacijom dviju različitih vizualnih tehnologija, preciznije kombinacijom fotogrametrije i video analize, dali prijedlog metodologije za praćenje progressa i procjenu produktivnosti zemljanih radova prilikom dubokih i obimnih količina iskopa. Autori Kim i dr. [7] su istaknuli da je osnova za praćenje i kontrolu izvedbe zemljanih radove detekcija radnog statusa građevinskih strojeva. Iz tog su razloga razvili metodologiju za automatsko praćenje i detekciju radnog statusa strojeva bagera i kamiona kiperu u video zapisima. Detekcija radnog statusa bagera i kamiona kiperu odnosi se na detekciju aktivnog rada stroja ili stanja mirovanja. Autori Roberts i Golparvar-Fard [8] su predložili metodologiju koja je, po njihovim riječima, komplementarna (prethodno navedenoj) metodologiji autora Kim i dr. [7]. U svojem radu, autori Roberts i Golparvar-Fard [8] su posebno istaknuli obećavajuće mogućnosti automatske detekcije građevinskih strojeva u video zapisima primjenom naprednih računalnih programa. Razvili su metodologiju za automatsko praćenje i detekciju radnih operacija bagera i kamiona kiperu. Detekcija radnih operacija bagera u video zapisima se prvenstveno odnosi na automatsku detekciju odvijanja iskopa na gradilištu, zatim zaokretanja kraka bagera, utovara u kamione kiperu te stanja mirovanja, dok se automatska detekcija radnih operacija kamiona kiperu prvenstveno odnosi na detekciju punjenja sanduka kamiona kiperu (utovara) ili kretanja (vožnje) kamiona kiperu na gradilištu. Autori Kim i dr. [7] te Roberts i Golparvar-Fard [8] su za analize video zapisa i detekciju radnog statusa, odnosno radnih operacija, koristili napredan računalni program MATLAB. Navedeni pregled literature ukazuje na vrijedan doprinos vizualnih tehnologija za praćenje progressa i mjerenje stvarne produktivnosti građevinskih strojeva. Također, računalni program MATLAB ističe se kao moćan alat za rješavanje znanstvenih i tehničkih problema.

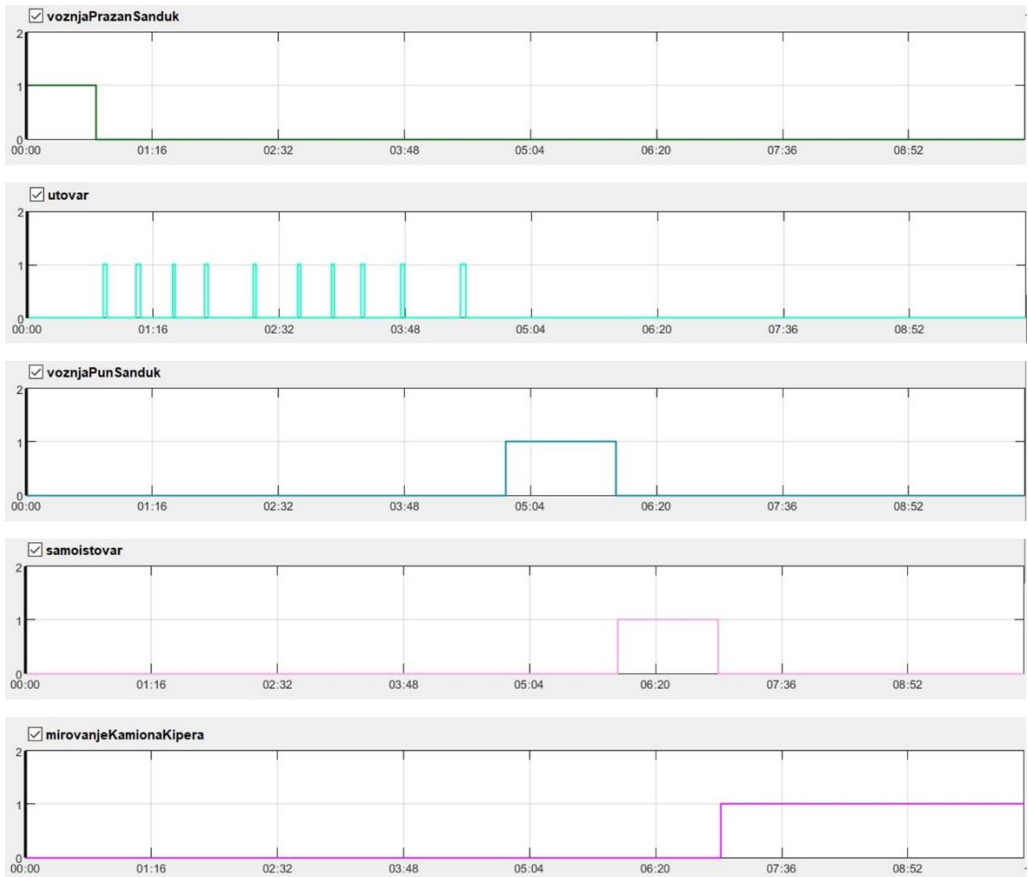
3. Prijedlog metodologije i rezultati

U ovom radu, predmet opažanja i snimanja videokamerom, je jedno aktivno gradilište u Rijeci, u tijeku kojeg trenutno traju zemljani radovi. Na dan snimanja, izvođenje zemljanih radova sastojalo se od nekoliko ponavljajućih ciklusa: iskopa i utovara iskopanog materijala bagerom u sanduk kamiona kiperu, vožnje kamiona kiperu s punim sandukom do obližnjeg gradilišnog deponija za iskopani materijal, (samo)istovara kamiona kiperu, te povratka kamiona kiperu s praznim sandukom do mjesta za utovar. Video analizom se, pritom, obradio jedan video zapis, koji ukupno traje oko 10 minuta. Spomenuti video zapis sadrži prikaz vožnje kamiona kiperu od gradilišnog deponija do mjesta za utovar, odvijanje iskopa i utovara materijala bagerom u sanduk kamiona kiperu, vožnju kamiona kiperu do gradilišnog deponija te (samo)istovar utovarenog materijala, nakon čega je slijedilo mirovanje kamiona kiperu kod gradilišnog deponija. Video zapisom je, dakle, obuhvaćeno vrijeme jednog ciklusa kamiona kiperu za promatrano gradilište te vrijeme mirovanja kamiona kiperu unutar trajanja video zapisa. Računalni program koji se koristio za analizu video zapisa je MATLAB. MATLAB je skraćenica engleskog naziva *MATrix LABORatory*, a predstavlja istodobno i programski paket namijenjen numeričkom računanju i modeliranju, ali i viši programski jezik namijenjen raznim znanstvenim i tehničkim primjenama [9]. Omogućuje brojne podatkovne, video i grafičke analize te razvoj naprednih algoritama, modela i simulacija u svrhu rješavanja matematičkih, inženjerskih i znanstvenih problema te izrade vizualizacija i aplikacija. U radu, prijedlog metodologije, za analizu video zapisa u MATLAB-u, uključuje unos odgovarajućih oznaka i označavanje radnih operacija vezanih za pojedine oznake. Oznake za radne operacije kamiona kiperu u video zapisu za promatrano aktivno gradilište u Rijeci, odnosno oznake za jedan vremenski ciklus kamiona kiperu s vremenom mirovanja su: „voznjaPrazanSanduk“, „utovar“, „voznjaPunSanduk“, „samoistovar“, „mirovanjeKamionaKiperu“. Nakon unosa oznaka i povezivanja s odgovarajućim radnim operacijama u video zapisu, u MATLAB-u je omogućen pregled video zapisa s oznakama. Tako Slika 1. prikazuje nekoliko izdvojenih, karakterističnih, slika iz video zapisa u

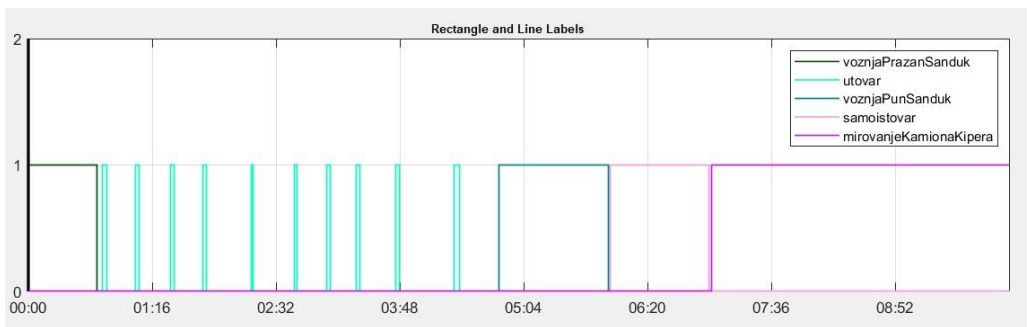
MATLAB-u sa spomenutim oznakama. Oznake iz video zapisa mogu se izdvojiti te zasebno prikazati. Tako Slika 2. prikazuje trajanje (i broj) pojedinačnih oznaka (radnih operacija) u vremenu odvijanja radova (video zapisa), dok Slika 3. prikazuje grupni, zbirni, prikaz oznaka. U radu su, dakle, dani rezultati (Slika 2. i 3.) za jedan video zapis, odnosno za jedan od ponavljajućih ciklusa izvođenja radova. Rezultati prikazuju trajanje jednog vremenskog ciklusa kamiona kiperera na gradilištu. Analiza nekoliko ponavljajućih ciklusa izvođenja radova, uz poznavanje zapremnine sanduka kamiona kiperera ili dubinske lopate bagera, može služiti kao podloga za procjenu stvarne produktivnosti strojeva i/ili izračuna mjernog učinka. Također, rezultati s oznakama mogu služiti kao jasna i pregledna podloga za praćenje i kontrolu izvođenja radova, u smislu je li trajanje neke radne operacije (iznenada) (ne)opravdano dugo.



Slika 1. Devet izdvojenih slika u tijeku trajanja video zapisa, nakon obrade u MATLAB-u



Slika 2. Rezultati u vidu trajanja (i broja) pojedinačnog prikaza oznaka, nakon obrade video zapisa u MATLAB-u, pri praćenju kretanja i rada kamiona kipera za jedno gradilište u Rijeci



Slika 3. Rezultati u vidu trajanja (i broja) zbirnog prikaza oznaka, nakon obrade video zapisa u MATLAB-u, pri praćenju kretanja i rada kamiona kipera za jedno gradilište u Rijeci

4. Diskusija

Korištenje videokamere za praćenje i kontrolu građevinskih strojeva, radne snage, materijala i opreme može otkriti brojne nedostatke prilikom izvođenja radova na gradilištu [10]. Prednosti korištenja videokamere za praćenje izvođenja zemljanih radova ogleda se u vizualnoj reprodukciji stvarnih, zbiljskih, okolnosti i prilika u kojima su se građevinski strojevi nalazili u vremenu snimanja. Vizualnim vidom u stvarne, istinske, situacije koje su se odvijale na gradilištu, smanjene su mogućnosti netočne interpretacije prikupljenih podataka. Videokamerom se izvođenje zemljanih radova može snimati s veće udaljenosti od građevinskih strojeva i pritom se ne remeti normalan rad stroja i nisu potrebne instalacije nekih, određenih, alata na same strojeve, koji bi omogućili praćenje rada. Međutim, potrebno je pronaći poziciju koja omogućuje jasan i uočljiv prikaz rada strojeva. „Preklapanje“ strojeva u video zapisima može uzrokovati netočnu generaciju podataka pri video analizi. Nepovoljni vremenski uvjeti, poput kiše, magle, snijega, ili jakog vjetrova, kao i uvjeti sa slabijom prirodnom ili umjetnom rasvjetom, za posljedicu mogu imati video zapise sa smanjenom oštrinom, ili s mutnim prikazom sadržaja. Međutim, za vrijeme izrazito nepovoljnih vremenskih uvjeta, i sama izvedba radova najčešće se zaustavlja [11]. Video zapis treba biti odgovarajuće kvalitete i dužine budući da je video analiza uvjetovana mogućnostima računala i MATLAB-a. Stoga, pri snimanju i odabiru sadržaja video zapisa treba biti posebno oprezan. Video zapisi, u svrhu točnih i pouzdanih analiza, trebaju sadržavati neke ključne i značajne radne operacije za izvođenje radova. MATLAB ima brojne mogućnosti za analizu video zapisa. Rezultati video analiza u MATLAB-u, prema prijedlogu metodologije u ovom radu, s unesenim određenim oznakama za odgovarajuće radne operacije, mogu služiti kao jasna i pregledna podloga za procjenu stvarne produktivnosti ili za praćenje i kontrolu izvođenja radova. Načelo produktivnosti pri iskupu i/ili utovaru materijala predstavlja težnja za što većom (realno mogućom) količinom iskopanog i/ili utovarenog materijala u što kraćem (realno mogućem) vremenu.

Općenito, jedna je od trenutno najnaprednijih performansi MATLAB-a, njegova sposobnost „učenja“ tako da može automatski i autonomno, uz kreiranje odgovarajuće baze podataka i „izgradnje“ naprednih algoritama, s nekom mjerom točnosti, prepoznati neke, bazom podataka definirane, relevantne stvari i pojave.

5. Zaključak

Izvođenje zemljanih radova predstavlja zahtjevan zadatak pri planiranju izvođenja radova zbog prisutne upitne točnosti procjena kategorija tla i/ili stijene te izražene osjetljivosti na nepovoljne vremenske prilike. U takvim uvjetima teško je (ili nemoguće) unaprijed točno predvidjeti i isplanirati produktivnost građevinskih strojeva, kao i potrebno vrijeme za izvođenje radova te trošak. Potencijalno rješenje krije se u mjerenju stvarne produktivnosti građevinskih strojeva na gradilištu, primjenom predstavnika, obećavajućih i brzorastućih, područja bežičnih tehnologija, vizualnih tehnologija, vizualno-osjetljivih tehnologija, informacijsko-komunikacijskih tehnologija i sl. Rano uočavanje nepovoljne izvedbe, pruža mogućnosti za pravovremenu provedbu odgovarajućih, korektivnih, mjera. Rad daje kratak pregled prijedloga metodologije za praćenje i kontrolu kretanja i rada kamiona kipera na gradilištu, prilikom izvođenja zemljanih radova. Prijedlog metodologije uključuje primjenu videokamere i video analizu u MATLAB-u. Daljnja istraživanja zahtjevnog zadatka praćenja progressa izvedbe zemljanih radova uz točnu procjenu produktivnosti građevinskih trebaju svakako uključivati upotrebu videokamere i nekog naprednog računalnog programa, kao što je MATLAB.

Literatura

- [1] Šopić, M. i Vukomanović, M.: Praćenje i kontrola produktivnosti građevinske mehanizacije integracijom bežičnih tehnologija, 3. Simpozij doktorskog studija građevinarstva, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2017, str. 95-104,

- <https://doi.org/10.5592/CO/PhDSym.2017.09>
- [2] Šopić, M., Vukomanović, M. i Car-Pušić, D.: Značaj vizualnih tehnologija za praćenje progressa i procjene produktivnosti zemljanih radova, e-Zbornik, 8(15), 2018, str. 1-9.
- [3] Salem, A., Salah A., Ibrahim M. i Moselhi, O.: Study of Factors Influencing Productivity of Hauling Equipment in Earthmoving Projects using Fuzzy Set Theory, International Journal of Innovation, Management and Technology, 8(2), 2017, str. 151-154, [10.18178/ijimt.2017.8.2.719](https://doi.org/10.18178/ijimt.2017.8.2.719)
- [4] Rezazadeh Azar E., Dickinson S. i McCabe B.: Server-Customer Interaction Tracker: Computer Vision-Based System to Estimate Dirt-Loading Cycles, Journal of Construction Engineering and Management, 139(7), 2013, str. 785-794, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000652](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000652)
- [5] Golparvar-Fard M., Heydarian A. i Niebles J.C.: Vision-based action recognition of earthmoving equipment using spatio-temporal features and support vector machine classifiers, Advanced Engineering Informatics, 27(4), 2013, str. 652-663, <https://doi.org/10.1016/j.aei.2013.09.001>
- [6] Bügler M., Borrmann A., Ogunmakin G., Vela P. A. i Teizer J.: Fusion of Photogrammetry and Video Analysis for Productivity Assessment of Earthwork Processes, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 32(2), 2017, str. 107-123, <https://doi.org/10.1111/mice.12235>
- [7] Kim, J., Chi, S. i Seo, J.: Interaction analysis for vision-based activity identification of earthmoving excavators and dump trucks, Automation in Construction, 87, 2018, str. 297-308, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.016>
- [8] Roberts, D. i Golparvar-Fard, M.: End-to-end vision-based detection, tracking and activity analysis of earthmoving equipment filmed at ground level, Automation in Construction, 105, 2019, 102811, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.04.006>
- [9] Kovačić, B.: Matematički alati u elektrotehnici, udžbenik, Tehničko veleučilište u Zagrebu, 2013,
- [10] Bohn, J. S. i Teizer, J.: Benefits and barriers of construction project monitoring using high-resolution automated cameras, Journal of construction engineering and management, 136(6), 2010, str. 632-640, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000164](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000164)
- [11] Teizer J., Allread B. S., Fullerton C. E., Hinze, J.: Autonomous pro-active real-time construction worker and equipment operator proximity safety alert system, Automation in Construction, 19(5), 2010, str. 630-640, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.02.009>

VAŽNOST KOMUNIKACIJE U PROJEKTIMA ODRŽAVANJA VIŠESTAMBENIH ZGRADA U HRVATSKOJ

THE IMPORTANCE OF COMMUNICATION IN MULTI-APARTMENT BUILDINGS' MAINTENANCE PROJECTS IN CROATIA

Ivona Ivić¹, Anita Cerić¹

(1) Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, iivic@grad.hr, anita@grad.hr

Sažetak

U većim projektima održavanja višestambenih zgrada u Hrvatskoj javlja se velik broj sudionika: suvlasnici, predstavnik suvlasnika, upravitelj, izvođač radova, projektant i javna tijela koja sudjeluju u sufinanciranju. Zbog toga se u takvim projektima posebno ističe važnost dobre komunikacije za ostvarivanje ciljeva. U ovome je radu prikazano prvo istraživanje ovakve vrste o komunikaciji u projektima održavanja zgrada u Hrvatskoj. Istraživanje je provedeno putem anketnog upitnika, a ispitanici su bili članovi Udruge Upravitelj, koja okuplja tvrtke koje se bave upravljanjem i održavanjem zgrada u Hrvatskoj. Rezultati istraživanja pokazali su kako komunikacija između upravitelja i izvođača radova ima najveću ulogu u ostvarivanju ciljeva projekta, u smislu troškova, rokova i kvalitete izvedenih radova. Druga po važnosti komunikacijska veza je ona između upravitelja i predstavnika suvlasnika, dok je najmanje utjecajna veza između upravitelja i ostalih suvlasnika.

Gljučne riječi: višestambene zgrade, projekt održavanja zgrada, komunikacija, upravitelji

Abstract

Big multi-apartment buildings' maintenance projects in Croatia include a variety of participants: co-owners, a co-owners' representative, a property manager, a contractor, a designer and public authorities involved in co-financing. Consequently, such projects emphasize the importance of good communication for achieving its goals. This paper presents a research on communication in building maintenance projects in Croatia, which is the first of its kind. The research was conducted through a survey questionnaire, and the respondents were members of the Property Managers Association, which brings together companies dealing with the maintenance of buildings in Croatia. Communication between property manager and the contractor proved to take the greatest role in the realization of the project's objectives in terms of costs, deadlines and quality of the works performed. The second most important communication link is between the property manager and co-owners' representative. The least influential relationship is between the property manager and other co-owners.

Keywords: multi-apartment buildings, building maintenance project, communication, property managers

1. Uvod

Ulaganja u uporabu i održavanje neke zgrade u prosjeku su puno veća od ulaganja u njezinu izgradnju [1]. Osim ekonomskog aspekta, zbog ekoloških i socijalnih aspekata, u novije je vrijeme sve veća svijest o važnosti kvalitetnog sustava održavanja, koji se usredotočuje na održavanje nekretnine u prihvatljivom stanju tijekom cijelog njezinog životnog vijeka.

Radovi održavanja mogu biti manji, tj. s manje troškova i bez angažiranja vanjskog izvođača, ili veći projekti održavanja. Tipični projekti održavanja su energetske obnove zgrade i radovi preventivnog održavanja. S obzirom na to da se u većim projektima održavanja pojavljuju dodatni sudionici poput izvođača radova, projektanta i javnih tijela koja (moguće) sudjeluju u sufinanciranju radova, njihova je provedba vrlo kompleksna.

Često se javljaju konflikti zbog razilaženja u interesima različitih sudionika [2]. Višestambene zgrade poseban su izazov u tim slučajevima. Naime, potreban je velik trud za ostvarivanje koordinacije i kooperacije svih suvlasnika u donošenju odluka [3], a njihovo slaganje o određenim odlukama u praksi je ponekad teško postići. Glavni razlog tome je što različiti pojedinci (suvlasnici) imaju različite poglede na važnost određenih radova nad imovinom u svome vlasništvu. Zbog toga su i neka od istraživanja na polju održavanja zgrada usmjerena upravo na otkrivanje glavnih kriterija prema kojima se suvlasnici odlučuju na određene projekte održavanja [2, 4]. U situaciji s mnogo različitih interesnih sudionika, kao što su to projekti održavanja zgrada, dobra komunikacija postaje glavni aspekt uspješnog provođenja projekta. Naime, takvi projekti uglavnom su usmjereni na ostvarivanje zadovoljstva klijenata, tj. suvlasnika [5]. Da bi se to zadovoljstvo moglo postići, potrebna je dobra komunikacija s korisnicima zgrade i dokumentiranje njihovih potreba [6].

Osim toga, komunikacija mora funkcionirati i u svim ostalim informacijskim tokovima među sudionicima jer predstavlja važan aspekt svih projekata. Tu tvrdnju najbolje dokazuje izvješće organizacije Project Management Institute iz 2013. godine [7], u kojem se ističe kako u prosjeku 80 % projekata ostvaruje svoje ciljeve ako u njima organizacije uspješno komuniciraju. Njih 71 % završava u zadanom roku, a 76 % ostaje unutar planiranog budžeta. Za razliku od toga, samo 52 % projekata ostvaruje svoje ciljeve ako u njima nema uspješne komunikacije. Također, samo 37 % završava u zadanom roku, a 48 % ostaje unutar planiranog budžeta.

Iako je komunikacija često predmet istraživanja vezanih uz fazu izgradnje građevina, vrlo je malo istraživanja objavljeno o komunikaciji u fazi održavanja građevina [8]. Međutim, zbog spomenute važnosti i kompleksnosti projekata održavanja višestambenih zgrada, ključno je istražiti utjecaj komunikacije među sudionicima na njihovu uspješnu provedbu. Istraživanja na ovu temu nije jednostavno provesti zbog različitosti u zakonodavnim okvirima pojedinih zemalja koje različito definiraju sudionike u takvim projektima. S obzirom na to da autori dolaze iz Hrvatske te poznaju tamošnje uvjete upravljanja i održavanja zgrada, Hrvatska je odabrana kao primjer prikaza utjecaja komunikacije među različitim sudionicima na glavne elemente uspješnosti njihovih projekata održavanja.

U radu je prikazano istraživanje provedeno među članovima Udruge Upravitelj koja okuplja tvrtke koje se bave upravljanjem i održavanjem zgrada u Hrvatskoj. Pozadina istraživanja objašnjena je kroz fenomen komunikacijskih rizika koji se pojavljuju u projektima, a u okolnostima provođenja projekata održavanja višestambenih zgrada u Hrvatskoj.

2. Komunikacijski rizici u projektima

Komunikacijski rizici mogu se pojaviti u bilo kojem trenutku životnog vijeka projekta. Njihova najvažnija posljedica je upravo neuspjeh projekta. Project Management Institut [7] navodi kako čak 56 % ukupnih troškova rizika u projektima otpada na komunikacijske rizike.

U smislu projekata održavanja višestambenih zgrada, neuspješna komunikacija može dovesti do negativnog utjecaja suvlasnika na ishod projekta. Tj., nepoznavanje svih potrebnih informacija može dovesti do odustajanja od potpore projektu održavanja ili s druge strane izvršenjem radova koji svojom kvalitetom ne odgovaraju početnim očekivanjima.

Kao izvor komunikacijskih rizika u projektima, Cerić [9] navodi informacijsku asimetriju. Njezino je istraživanje vezano uz agencijsku teoriju koja na modelu agencijskih odnosa opisuje neke aspekte ljudskog ponašanja. Naime, u većini projekata postoje klijenti (investitori) i izvođači. Agencijska teorija pak govori kako u svim odnosima postoje principal i agent. Principal zapošljava agenta, a agent u njegovo ime obavlja neki posao, za određenu naknadu. Informacijska asimetrija je stanje u kojem jedna strana zbog samointeresa ne iznosi sve potrebne informacije drugoj strani [10]. Tri pojavna oblika u projektima su: (a) skrivene karakteristike – mogu uzrokovati nepravilan izbor partnera; (b) skrivene informacije – mogu uzrokovati moralne probleme, zbog stavljanja vlastitih potreba ispred interesa drugih; (c) skrivene namjere – uzrokuju problem zbog oportunističkog ponašanja jedne strane.

Skrivene karakteristike javljaju se u fazi prije potpisivanja ugovora u projektu, a skrivene informacije i namjere mogu se javiti nakon potpisivanja ugovora, tijekom suradnje. Informacijska asimetrija vrlo se lako može pojaviti u projektima održavanja zgrada zbog velikog broja sudionika različitih interesa. Zbog toga je važno istražiti njezin utjecaj na uspjeh tih projekata i na taj način sugerirati sudionicima da obrate pažnju na poboljšavanje međusobne komunikacije.

3. Specifičnosti održavanja zgrada u Hrvatskoj

U Hrvatskoj je održavanje zgrada definirano Zakonom o vlasništvu i drugim stvarnim pravima (ZV) [11]. Prema ZV, vlasnici stanova upravljanje svojom stambenom zgradom povjeravaju upravitelju zgrade. Jedno od načela na kojima počiva ZV je načelo pravnog jedinstva nekretnine, kao i povezivanje posebnih dijelova zgrade, dakle stanova i poslovnih prostora sa suvlasništvom te zgrade. Stoga se vlasnici posebnih dijelova neke nekretnine nazivaju suvlasnici i zajednički donose odluke o njezinom održavanju. Upravitelj je fizička ili pravna osoba kojoj suvlasnici povjeravaju upravljanje njihovom zgradom, tj. nalogoprimac suvlasnika. Predstavnik suvlasnika je jedan od suvlasnika koji je ovlašten za zastupanje i predstavljanje svih suvlasnika kod upravitelja zgrade, te na taj način štiti interese suvlasnika kod upravitelja. Upravitelj je obvezan koliko je najviše moguće čuvati interese svih suvlasnika nekretnine te mora u obavljanju poslova postupati prema njihovim uputama. Njegova najvažnija dužnost je briga da se zajednički dijelovi i uređaji zgrade održavaju u stanju nužnom za normalno korištenje. Prilikom obavljanja poslova za suvlasnike, a posebno izbora ponude za obavljanje pojedinih radova na zgradi, upravitelji moraju objaviti javni natječaj za prikupljanje pisanih ponuda. Izvođači radova tada mogu dati ponude, od kojih se bira ona najpovoljnija. Kod većih i složenijih projekata, angažiraju se i projektanti. Također, za poslove koji iziskuju velike materijalne izdatke (npr. energetska obnova zgrade), često u sufinanciranju sudjeluju javna tijela: ministarstva ili tijela Europske Unije. Upravitelj sudjeluje kao središnja figura u komunikaciji i prenošenju informacija između suvlasnika (klijenata), izvođača, projektanta te javnih tijela.

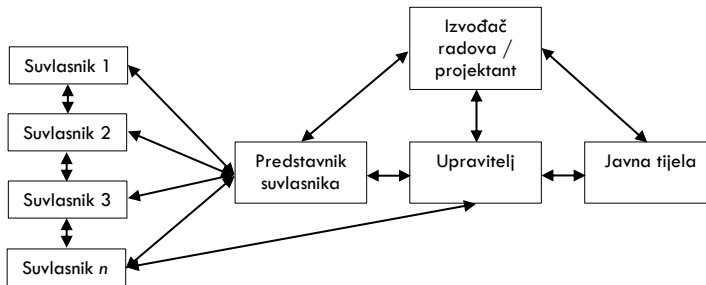
4. Metodologija istraživanja

U cilju otkrivanja veze između komunikacije među različitim sudionicima projekata održavanja višestambenih zgrada u Hrvatskoj i elemenata uspjeha tih projekata, napravljeno je istraživanje među upraviteljima zgrada, članovima Udruge Upravitelj. Naime, Udruga Upravitelj je najveća i najorganiziranija zajednica koja povezuje tvrtke koje se bave upravljanjem zgradama u Hrvatskoj.

Prvi korak istraživanja bila je identifikacija elemenata uspjeha ovih projekata, koji su dovoljno općeniti da mogu vrijediti za sve projekte održavanja. Tako je odabran najopćenitiji slučaj, u kojem se uspjeh projekta mjeri zadovoljavanjem kriterija troškova, rokova i kvalitete izvedbe, kao tri primarne značajke projekta. Uspjeh projekata održavanja već su istraživali neki od znanstvenika (npr. [12]), međutim oni donose rezultate za specifične primjere projekata te nisu bili prikladni za ovu svrhu.

Drugi korak je bila izrada sheme komunikacijskih tokova koji se pojavljuju u predmetnim projektima (Slika 1.). U ovom primjeru, strelice pokazuju moguće smjerove komunikacije među

različitim sudionicima. Za daljnju analizu odabrani su komunikacijski tokovi vezani uz upravitelja, kao središnju figuru u definiranju i provođenju projekata održavanja zgrada.

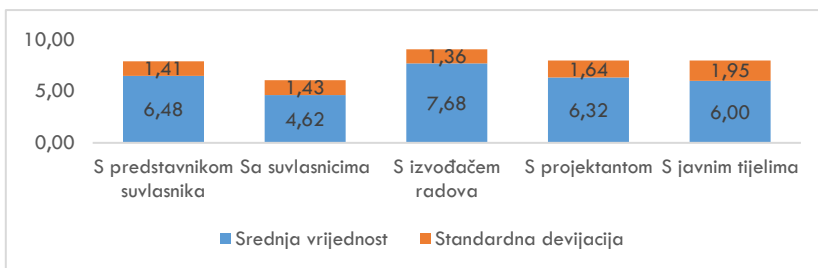


Slika 1. Shema komunikacijskih tokova među sudionicima u projektima održavanja zgrada (prilagođeno prema [13])

Nakon identifikacije odnosa sudionika i glavnih elemenata uspjeha projekta, formiran je anketni upitnik za provedbu ispitivanja. Upitnik je podijeljen članovima Udruge Upravitelj na njihovom godišnjem skupu Savjetovanje upravitelja 2019. Članovi udruge odabrani su kao najaktivniji predstavnici djelatnosti upravljanja zgradama u Hrvatskoj. Ukupno je podijeljeno 50 anketnih listića, a skupljeno je 23 odgovora, što čini odaziv od 46 %. Postotak neodgovorenih pitanja iznosio je 1,3 %. Međutim, broj odgovora ocijenjen je kao dovoljan za analizu rezultata jer je cilj istraživanja bio utvrditi početne okvire u ocjenjivanju važnosti komunikacije među sudionicima u projektima održavanja. Zadnji je korak uključivao obradu rezultata ankete, koji su sažeto prikazani u sljedećem poglavlju.

5. Rezultati istraživanja

Anketni upitnik organiziran je u tri dijela: 1. Opći podaci o upraviteljima; 2. Pitanja o upravljanju zgradama; i 3. Važnost komunikacije u projektima održavanja zgrada. U prvom dijelu rezultata tako su analizirani profili ispitanika. Ispitanici su bili većim dijelom direktori ili vlasnici tvrtki (56,5 %) s prosječno 17,3 godina iskustva u djelatnosti upravljanja zgradama. Po njihovoj procjeni, njihove tvrtke u prosjeku upravljaju s 399 587 m² prostora.



Slika 2. Učestalost komunikacije upravitelja s ostalim sudionicima u projektima održavanja zgrada

U drugome dijelu odgovarali su o svome prosječnom zadovoljstvu s dosadašnjim projektima održavanja, koje su ocjenjivali prema skali od 1 (izrazito nezadovoljan/na) do 9 (izrazito zadovoljan/na). Prema upraviteljima, ostvarivanje kvalitete je bilo najčešće, zatim ostvarivanje planiranih troškova, a ostvarivanje rokova se pokazalo kao najrjeđe. Međutim, ocjene u rasponu 6,09 – 6,36 od ukupno mogućih 9, pokazuju kako je to zadovoljstvo zapravo prosječno.

U trećem su dijelu odgovarali na pitanja o učestalosti komunikacije s ostalim sudionicima (Slika 2.) te o važnosti dobre komunikacije pojedinih sudionika u odnosu na ostvarenje ciljeva projekta, u smislu ostvarenja troškova, rokova i kvalitete izvedbe (Tablice 1.-3.). Za ova pitanja također

je upotrebljavana skala od 1 do 9. Za učestalost komunikacije upravitelji su odgovarali od 1 (nikad) do 9 (na svakodnevnoj bazi), dok su pitanja o važnosti komunikacije bila ocjenjivana također od 1 (vrlo mala važnost) do 9 (vrlo velika važnost).

Tablica 1. Prikaz rezultata važnosti komunikacije u odnosu na ostvarenje uvjeta troškova projekta

Poredak	Odnos	Srednja vrijednost	Standardna devijacija
4.	Su vlasnici – predstavnik su vlasnika	7,87	1,49
3.	Predstavnik su vlasnika – upravitelj	7,87	1,36
5.	Su vlasnici – upravitelj	7,48	1,78
1.	Upravitelj – izvođač radova	8,04	1,33
2.	Upravitelj – projektant	7,87	1,32
6.	Upravitelj – javna tijela	7,30	1,64

Tablica 2. Prikaz rezultata važnosti komunikacije u odnosu na ostvarenje uvjeta rokova projekta

Poredak	Odnos	Srednja vrijednost	Standardna devijacija
4.	Su vlasnici – predstavnik su vlasnika	7,04	1,66
2.	Predstavnik su vlasnika – upravitelj	7,43	1,41
6.	Su vlasnici – upravitelj	6,87	1,69
1.	Upravitelj – izvođač radova	8,00	1,31
5.	Upravitelj – projektant	7,04	1,80
3.	Upravitelj – javna tijela	7,22	1,76

Tablica 3. Prikaz rezultata važnosti komunikacije u odnosu na ostvarenje uvjeta kvalitete projekta

Poredak	Odnos	Srednja vrijednost	Standardna devijacija
5.	Su vlasnici – predstavnik su vlasnika	7,05	1,86
3.	Predstavnik su vlasnika – upravitelj	7,26	1,68
6.	Su vlasnici – upravitelj	7,04	1,89
1.	Upravitelj – izvođač radova	8,30	1,15
2.	Upravitelj – projektant	8,00	1,54
4.	Upravitelj – javna tijela	7,26	1,91

Prema prikazanome na Slici 2., upravitelji najčešće komuniciraju s izvođačem radova, potom s predstavnikom su vlasnika te projektantom. Komunikacija s javnim tijelima i su vlasnicima ocijenjena je kao najrjeđa. U Tablicama 1.-3. kao najvažniji odnos ističe se onaj između upravitelja i izvođača radova, u sva tri slučaja. Ovakvi rezultati značajni su jer pokazuju kako komunikacija između upravitelja i izvođača radova ima najveći utjecaj na konačne rezultate projekta. Međutim, komunikacija između predstavnika su vlasnika i upravitelja ocijenjena je kao druga po važnosti u odnosu na ostvarenje planiranih rokova, te treća u odnosu na troškove i kvalitetu izvedbe. Najslabiju ulogu u uspjehu projekata pak ima komunikacija između su vlasnika i upravitelja.

6. Zaključak

Zbog velikog broja različitih sudionika, komunikaciji se u projektima održavanja zgrada mora obratiti posebna pozornost. Prikazani rezultati istraživanja provedenog među upraviteljima u Hrvatskoj pokazali su kako je za ostvarivanje planiranih troškova, rokova i kvalitete izvedbe

najvažnija dobra komunikacija između upravitelja zgrade i izvođača radova, dok je najmanje važna komunikacija između upravitelja i suvlasnika. To se može objasniti time što suvlasnici imaju predstavnika, a on djeluje kao posrednik u komunikaciji između njih i upravitelja, pa ostali komunikacijski tokovi nisu potrebni, pa čak ni poželjni.

Nedostatak ovog istraživanja ogleda se u malom broju ispitanika ($n < 30$), koji onemogućava dublje statističke analize. Međutim, cilj istraživanja bio je utvrditi početne aspekte o važnosti komunikacije među sudionicima u projektima održavanja zgrada, a on je ostvaren i bez daljnjih analiza. To je bilo moguće jer su ispitanici bili jedni od najaktivnijih članova djelatnosti upravljanja i održavanja zgrada u Hrvatskoj.

Buduća istraživanja moguće je usmeriti na otkrivanje kanala informacija i upotrebljanih medija u projektima održavanja. Na taj način došlo bi se do spoznaja o trenutnom stanju u smislu bogatstva prenesenih informacija među sudionicima te bi se mogle dati daljnje smjernice za poboljšanje tog stanja. Sa spoznajama navedenim u ovom radu i rezultatima predloženih budućih istraživanja moglo bi se direktno utjecati na poboljšanje u ostvarivanju ciljeva projekata održavanja zgrada u Hrvatskoj.

Literatura

- [1] Krstić, H., Marenjak, S.: Analysis of buildings operation and maintenance costs, *Građevinar*, vol. 64, br. 4, 2012, 293 – 303, DOI: 10.14256/JCE.651.2011.
- [2] Yau, Y.: Multicriteria decision making for homeowners' participation in building maintenance, *Journal Of Urban Planning And Development*, vol. 138, br. 2, 2012, 1 – 11, DOI: 10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000108.
- [3] Yau, Y.: Collectivism and activism in housing management in Hong Kong, *Habitat International*, vol. 35, br. 2, 2011, 327 – 334, DOI: 10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000108.
- [4] Yusof, N.A., Abdulllah, S., Zubedy, S., Najib, N.U.M.: Residents' maintenance priorities preference: the case of public housing in Malaysia, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 62, 2012, 508 – 513, DOI: 10.1016/j.sbspro.2012.09.083.
- [5] Tan, Y., Shen, L., Langston, C., Lu, W., Yam, C.H.M.: Critical success factors for building maintenance business: a Hong Kong case study, *Facilities*, vol. 32, br. 5/6, 2014, 208 – 225, DOI: 10.1108/F-08-2012-0062.
- [6] Arditi, D., Nawakorawit, M.: Issues in building maintenance: property managers' perspective, *Journal of Architectural Engineering*, vol. 5, br. 4, 1999, 117 – 132, DOI: 10.1061/(ASCE)1076-0431(1999)5:4(117).
- [7] Project Management Institution: PMI's Pulse of the Profession In-Depth Report: The High Cost of Low Performance: The Essential Role of Communications, 2013, www.pmi.org/-/media/pmi/documents/public/pdf/learning/thought-leadership/pulse/pulse-of-the-profession-2013.pdf, pristupljeno: 30.5.2019.
- [8] Hua, G.C., Sher, W., Pheng, L.S.: Factors affecting effective communication between building clients and maintenance contractors, *Corporate Communications: An International Journal*, vol. 10, br. 3, 2005, 240 – 251, DOI: 10.1108/13563280510614492.
- [9] Cerić, A.: *Trust in Construction Projects*, Routledge, 2016, DOI: 10.4324/9781315747675.
- [10] Jäger, C.: *The Principal-Agent Theory within the Context of Economic Sciences*, 2008, Herstellung und Verlag, Books on Demand GmbH.
- [11] Zakon o vlasništvu i drugim stvarnim pravima, NN 91/96, 68/98, 137/99, 22/00, 73/00, 129/00, 114/01, 79/06, 141/06, 146/08, 38/09, 153/09, 143/12, 152/14.
- [12] Lam, E.W.M., Chan, A.P.C., Chan, D.W.M.: Benchmarking success of building maintenance projects, *Facilities*, vol. 28, br. 5/6, 2010, 290 – 305, DOI: 10.1108/02632771011031529.
- [13] Nahod, M.-M., Cerić, A.: Zrelost zgrada za energetska obnovu, *Savjetovanje upravitelja nekretninama, Supetar na Braču, Udruga Upravitelj*, 35 – 44, 2015.

ANALIZA ENERGETSKOG SVOJSTVA ZGRADA - PROVOĐENJE IN SITU MJERENJA

BUILDING ENERGY PERFORMANCE ANALYSIS – IN-SITU MEASUREMENTS

Mihaela Teni¹, Hrvoje Krstić¹

(1) Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, mteni@gfos.hr, hrvoje.krstic@gfos.hr

Sažetak

Prilikom planiranja energetske obnove postojećih zgrada, ocjena stvarne toplinske kvalitete ovojnice zgrade od ključne je važnosti za donošenje odluka o izboru ekonomski opravdanih tehnologija energetske obnove i provedbu energetske učinkovite mjere u svrhu poboljšanja energetske svojstva zgrada. S obzirom na trenutno postavljene zahtjeve za postizanje gotovo nulte energije i postojanje velikih razlika između stvarnog i projektiranog toplinskog ponašanja zgrada, sve se veći značaj pridaje korištenju nerazornih eksperimentalnih in situ metoda za određivanje stvarnih toplinskih svojstava građevnih elemenata u postojećim zgradama. U radu su prikazane značajke i ograničenja dvije često korištene nerazorne in situ metode za ocjenu stvarnog energetske svojstva zgrade: mjerenje zrakopropusnosti (Blower door test) i mjerenje koeficijenta prolaska topline (Heat flow meter - HFM method).

Ključne riječi: ovojnica zgrade, in situ, zrakopropusnost, koeficijent prolaska topline

Abstract

Identifying the actual thermal performance of a building envelope is crucial when decisions are made concerning the energy refurbishment of existing buildings and the implementation of energy-saving measures regarding appropriate and economically feasible building technology selection to improve energy performance of buildings. Considering the current nZEB policy and existence of large differences between the actual and theoretical thermal performance of buildings, there is an increasing interest in the use of nondestructive in-situ experimental methods to enable assessments of the actual thermal performance of building elements in existing buildings. This paper presents the main properties and limitations of the most commonly used nondestructive in-situ methods for assessing the real energy performance of a building: Blower door air permeability test method and Heat flow meter (HFM) method for thermal transmittance assessment.

Keywords: building envelope, in-situ, air permeability, thermal transmittance coefficient

1. Uvod

Glavna strategija smanjenja potrošnje energije na prostoru Europske unije je povećanje energetske učinkovitosti. U području zgradarstva, cilj je povećati energetske učinkovitost postojećih i novih zgrada budući da prema Direktivi europskog parlamenta i vijeća Europske Unije (EU) 2018/844 [1] do 2050. godine sve nove zgrade i postojeće zgrade trebaju zadovoljiti kriterije zgrade približno nulte energije (eng. nearly Zero Energy Building, nZEB). S obzirom da je 75% postojećeg fonda zgrada energetske učinkovito [2] najveći izazov i glavni zadatak u ostvarenju cilja energetske visokoučinkovitog i dekarboniziranog fonda zgrada predstavlja povećanje stope, kvalitete i učinkovitosti energetske obnove postojećih zgrada.

Prilikom planiranja energetske obnove postojećih zgrada i provođenja energetske pregleda, ocjena stvarne toplinske kvalitete ovojnice zgrade od ključne je važnosti za donošenje odluka o izboru ekonomski opravdanih tehnologija energetske obnove i provedbu mjera za uštedu energije kako bi se povećala energetska učinkovitost zgrada. S obzirom na trenutno postavljene zahtjeve za postizanje gotovo nulte energije u zgradama i postojanje velikih razlika između stvarnog i projektiranog toplinskog ponašanja zgrada [3, 4], sve se veći značaj pridaje korištenju nerazornih eksperimentalnih *in situ* metoda za određivanje stvarnog energetskeg stanja zgrada.

Svako precjenjivanje ili podcjenjivanje toplinskih svojstava direktno utječe na energetske učinkovitost i potrošnju energije u zgradama. Pri provedbi energetske pregleda podaci su potrebni brzo, utječu na donošenje odluka prilikom izbora mjera za povećanje energetske učinkovitosti i njihovoj isplativosti. Stoga se, ukoliko postoji opravdana sumnja u točnost ulaznih podataka potrebnih za izračun energetske svojstava vanjske ovojnice i tehničkih sustava, prilikom provođenja energetske pregleda zgrada preporuča provođenje dodatnih mjerenja kao što su mjerenje zrakopropusnosti zgrade (eng. Blower door test), identifikacija mjesta toplinskih gubitaka kroz vanjsku ovojnicu korištenjem infracrvene termografije (ICT), mjerenje koeficijenta prolaska topline ili toplinskog otpora i mjerenja tehničkih karakteristika u sustavima grijanja, hlađenja, ventilacije i klimatizacije.

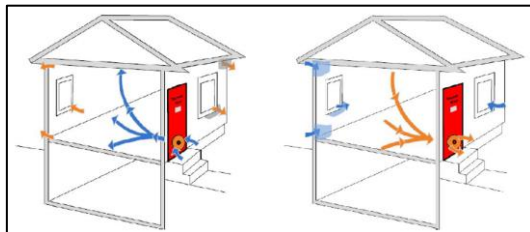
U radu su prikazane značajke i ograničenja često primjenjenih nerazornih *in situ* mjerenja za ocjenu stvarnog energetskeg svojstva zgrade. Mjerenja analizirana u ovom radu su mjerenje zrakopropusnosti (Blower door test) te mjerenje koeficijenta prolaska topline (Heat flow meter - HFM method) kao najvažnijeg čimbenika koji se koristi za opisivanje toplinskih svojstava zgrada, a time i ukupne energetske učinkovitosti neke zgrade [5].

2. In situ nerazorne metode mjerenja

2.1. Ispitivanje zrakopropusnosti - BlowerDoor metoda

Zrakopropusnost omotača zgrade predstavlja intenzitet nekontroliranog strujanja zraka kroz omotač zgrade kao rezultat razlike tlaka između unutarnjeg i vanjskog zraka. Nekontrolirano strujanje zraka može se pojaviti kroz spojeve, veze između različitih materijala, dilatacije i druge propusne točke u ovojnici zgrade. Zahtjevi za zrakopropusnost često se nalaze u građevinskim propisima [6]. U Republici Hrvatskoj, zahtjevi za zrakopropusnost navedeni su u Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama [7]. Prema Propisu, prilikom ispitivanja za razliku tlakova između unutarnjeg i vanjskog zraka od 50 Pa, izmjereni protok zraka, sveden na obujam unutarnjeg zraka, ne smije biti veći od vrijednosti $n_{50} = 3,0 \text{ h}^{-1}$ kod zgrada ili pojedinih toplinskih zona zgrada bez mehaničkog uređaja za ventilaciju, dok kod zgrada ili pojedinih toplinskih zona zgrada s mehaničkim uređajem za ventilaciju izmjereni protok zraka ne smije biti veći od vrijednosti $n_{50} = 1,5 \text{ h}^{-1}$. Ispunjavanje navedenih zahtjeva o zrakopropusnosti obavezno je prema Propisu dokazati ispitivanjem na izgrađenoj novoj ili rekonstruiranoj postojećoj zgradi prema HRN EN ISO 9972:2015, metoda određivanja A, prije tehničkog pregleda zgrade.

Metoda opisana prema HRN EN ISO 9972:2015 koja se koristi za mjerenje zrakopropusnosti omotača zgrade je metoda razlike tlaka tzv. „BlowerDoor test“ pri čemu se podatak o zrakopropusnosti zgrade dobiva pomoću ispitnog uređaja s ventilatorom. Blower door test je metoda koja se najčešće koristi za mjerenje zrakopropusnosti manjih zgrada, kuća i stanova [8]. Prilikom ispitivanja, ispitnim uređajem s ventilatorom stvara se prisilna razlika u tlaku između zraka u zgradi i vanjskog zraka u kontroliranim uvjetima. Uređaj omogućuje određivanje zrakopropusnosti građevine pri dekompresiji i kompresiji, Slika 1. Stvaranjem nadtlaka prilikom provođenja testa kompresije dolazi do strujanja zraka iz zgrade kroz propusna mjesta (prozori, vrata, pore, pukotine) prema vanjskome zraku. Kod dekompresije, stvara se podtlak ispuhivanjem zraka iz zgrade pri čemu svježiji vanjski zrak ulazi iz vanjskog prostora u unutarnji zrak u zgradi kroz propusna mjesta.



Slika 1. Test kompresije (lijevo) i dekompresije (desno) [9]

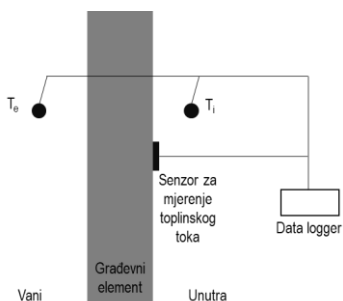
Metoda terenskog ispitivanja zrakopropusnosti učinkovita je, ponovljiva i nerazorna metoda jednako primjenjiva kako na nove tako i na postojeće zgrade. Osim nakon završetka izgradnje zgrada, mjerenja je moguće izvršiti već i tijekom izgradnje s ciljem otkrivanja nedostataka prije završnih radova te povećanja ili potvrde kvalitete izvođenja radova. Na taj način, metoda omogućava provjeru projektiranih vrijednosti već u fazi izgradnje te usporedbu s propisanim zahtjevima na relativno brz i jednostavan način. No osim brojnih prednosti, postoje i određena ograničenja metode. Bitno je naglasiti kako se prednosti odnose općenito na metodu ispitivanja zrakopropusnosti dok se ograničenja odnose uglavnom na ispitni uređaj kojim se provode mjerenja. Ovisno o uređaju koji se koristi za provođenje mjerenja glavna ograničenja odnose se na kapacitet uređaja odnosno snagu ventilatora te veličinu okvira koji se postavlja na vrata ili prozor. Ispitivanjima se pokazalo kako je kod velikih zgrada često teško dobiti preciznu sliku stvarnog stanja omotača zgrade. Prema Lee i sur. [8] najznačajniji parametri koje treba uzeti u obzir prilikom ispitivanja velikih zgrada s obzirom na volumen su brzina protoka zraka (Q) i razlika tlaka (ΔP), kao i metoda pronalaženja realističnije vrijednosti razlike tlaka.

Vrijednosti zrakopropusnosti zgrade utječu na gubitke energije, na učinkovitost ventilacijskih sustava, zvučnu i toplinsku ugodnost u zgradama [10]. Prema Kalamees [11] i Jokisalo i sur. [12], utjecaj infiltracije zraka na potrošnju energije čini do 30 % potrošnje energije za grijanje. S obzirom na značajan utjecaj na potrošnju energije, toplinske udobnosti i kvalitetu unutarnjeg zraka [13] važno je razumijevanje uloge zrakopropusnosti pri izgradnji novih i sanaciji postojećih zgrada [14] s ciljem povećanja energetske učinkovitosti. Iz tog razloga, mjerenje na terenu jedini je način da se dobije podatak o zrakopropusnosti budući da se prema postojećem općem konsenzusu mjerenje zrakopropusnosti ne može zamijeniti niti jednim prediktivnim modelom [15].

2.2. Mjerenje koeficijenta prolaska topline (U vrijednosti) – Metoda mjerenja toplinskog protoka

Prvo izdanje norme ISO 9869 [16] za mjerenje toplinskog otpora i toplinske prohodnosti *in situ* metodom mjerenja protoka topline kroz građevinske elemente (eng. Heat flow meter (HFM) method) objavljeno je 1994. godine. Ova norma je revidirana i zamijenjena novim izdanjem u 2014. godini [17]. HFM je nerazorna metoda koja se koristi za procjenu toplinskog otpora i

koeficijenta prolaska topline (U vrijednosti). Metoda se temelji na uspostavljanju minimalnog temperaturnog gradijenta između unutarnjeg i vanjskog prostora, čime se osigurava dovoljan protok topline. Postupak mjerenja U vrijednosti temelji se na direktnom mjerenju protoka topline i unutarnje (T_i) i vanjske temperature (T_e) s obje strane elementa u stacionarnim uvjetima, Slika 2. Međutim, ovojnica zgrade je izložena stalnim promjenama meteoroloških uvjeta zbog čega je ove uvjete teško postići. Budući da je opisano stabilno stanje u stvarnosti teško ostvarivo [18] preporučuju se dugotrajna mjerenja čime se na neki način simuliraju stabilni meteorološki uvjeti [14] te korištenje jedne od predloženih statističkih metoda za obradu podataka: metode prosjeka ili dinamičke metode.



Slika 2. Shematski prikaz HFM metode prema normi ISO 9869-1: 2014

HFM metoda je poznata, opisana formulama i u normi, najčešće korištena nerazorna metoda za određivanje koeficijenta prolaska topline [19, 20]. Mjerna oprema lagana je i jednostavna [4] za prenošenje zbog čega se metoda može koristiti kako u laboratorijskim uvjetima tako i *in situ* [17]. Međutim, s obzirom da je u realnim uvjetima teško postići stacionarne uvjete, metoda je teško provediva na terenu. Brojna istraživanja u kojima je HFM metoda korištena pokazala su odstupanja mjerenih vrijednosti i preko 100% u odnosu na teorijske [21-23], a terenska mjerenja su provođena i po nekoliko godina. Na temelju dosadašnjih istraživanja pokazalo se da na točnost mjerenja HFM-a mogu utjecati brojni čimbenici kao što su oblik, veličina, položaj i kut postavljanja senzora za mjerenje toplinskog toka [24], točnost opreme [25], orijentacija elementa koji se ispituje [26], vremenski i klimatski uvjeti (brzina vjetera, sunčevo zračenje i padaline) [3], vlaga [27], temperaturna razlika [22] i dužina trajanja ispitivanja [28]. Međutim, treba istaknuti da navedeni čimbenici nisu specifični samo za HFM metodu.

S obzirom na uočene brojne nedostatke i ograničenja metoda propisanih normama [17, 29], u posljednjih nekoliko godina mnogi autori pokazali su sve veći interes za daljnjim razvojem i poboljšanjem *in situ* metodologija za određivanje stvarnih toplinskih svojstava građevnih elemenata *in situ*. Osnovna ideja je pronaći brzu, jednostavnu, jeftinu metodu i definirati točnost i uvjete primjene. S ciljem poboljšanja točnosti i pouzdanosti *in situ* mjerenja U vrijednosti građevinskih elemenata, čak i u ljetnim uvjetima u kojima se teško provode i postižu pouzdani podaci [22, 26, 30], kao i skraćivanja vremena ispitivanja potrebnog za pouzdanu procjenu, u posljednjih nekoliko godina nekoliko autora predložilo je primjenu novih metoda [30-34].

3. Zaključak

In situ mjerenja vrlo su korisna za određivanje stvarnih toplinskih svojstava građevnih elemenata u postojećim zgradama, budući da se vrijednosti utvrđene na terenu u stvarnim uvjetima mogu značajno razlikovati od teorijskih. U ovom radu prikazane su značajke i ograničenja metode mjerenja zrakopropusnosti (Blower door test) i metode mjerenja koeficijenta prolaska topline (Heat flow meter (HFM) method) s obzirom da oba navedena parametra imaju značajan utjecaj na potrošnju energije u zgradama te samim tim i na odabir ekonomski opravdanih tehnologija

energetske obnove i provedbu mjera za uštedu energije kako bi se povećala energetska učinkovitost zgrada.

Literatura

- [1] Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency, in, Official Journal of the European Union 2018
- [2] BPIE, 97% of buildings in the EU need to be upgraded, factsheet, Brussels, 2017
- [3] Asdrubali, F., D'Alessandro, F., Baldinelli, G., Bianchi, F.: Evaluating in situ thermal transmittance of green buildings masonries - A case study, *Case Studies in Construction Materials*, 1, 2014, 53-59, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2014.04.004>
- [4] Desogus, G., Mura, S., Ricciu, R.: Comparing different approaches to in situ measurement of building components thermal resistance, *Energy and Buildings*, 43, 2011, 2613-2620, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.025>
- [5] Adhikari, R. S., Luchi, E., Pracchi, V.: Experimental measurements on thermal transmittance of the opaque vertical walls in the historical buildings, in: *Proceedings of the PLEA2012 - 28th Conference, Opportunities, Limits & Needs towards an Environmentally Responsible Architecture*, At Lima, Peru, 7-9, 2012
- [6] Relander, T. O., Holøs, S., Thue, J. V.: Airtightness estimation - A state of the art review and an en route upper limit evaluation principle to increase the chances that wood-frame houses with a vapour and wind-barrier comply with the airtightness requirements, *Energy and Buildings*, 54, 2012, 444-452, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.012>
- [7] Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (*Translation: Technical Regulation on the Rational Use of Energy and Thermal Insulation in Buildings*), in, Zagreb, „Narodne novine“ broj 128/15, 70/18, 73/18, 86/18
- [8] Lee, D. S., Jeong, J. W., Jo, J. H.: Experimental study on airtightness test methods in large buildings; proposal of averaging pressure difference method, *Building and Environment*, 122, 2017, 61-71, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.003>
- [9] Pešut, H.: Zrakopropusnost omotača zgrade, *Građevinar*, 64, 2012, 615-617
- [10] Sherman, M. H., Chan, R., *Building Airtightness: Research and Practice*, in, LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY REPORT NO. LBNL-53356 Berkeley CA 94720 2004
- [11] Kalamees, T.: Air tightness and air leakages of new lightweight single-family detached houses in Estonia, *Building and Environment*, 42, 2007, 2369-2377, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.001>
- [12] Jokisalo, J., Kurnitski, J., Korpi, M., Kalamees, T., Vinha, J.: Building leakage, infiltration, and energy performance analyses for Finnish detached houses, *Building and Environment*, 44, 2009, 377-387, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.03.014>
- [13] Baker, P.: U-values and traditional buildings, in Glasgow Caledonian University, 2011.
- [14] Fokaides, P. A., Kalogirou, S. A.: Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-Value) in building envelopes, *Applied Energy*, 88, 2011, 4358-4365, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.05.014>
- [15] Prignon, M., Van Moeseke, G.: Factors influencing airtightness and airtightness predictive models: A literature review, *Energy and Buildings*, 146, 2017, 87-97, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.062>
- [16] International Organization for Standardization. Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance (ISO 9869:1994)
- [17] International Organization for Standardization. Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance - Part 1: Heat flow meter method (ISO 9869-1:2014)
- [18] Lehmann, B., Ghazi Wakili, K., Frank, T., Vera Collado, B., Tanner, C.: Effects of individual climatic parameters on the infrared thermography of buildings, *Applied Energy*, 110, 2013, 29-43, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.03.066>

- [19] Guattari, C., Evangelisti, L., Gori, P., Asdrubali, F.: Influence of internal heat sources on thermal resistance evaluation through the heat flow meter method, *Energy and Buildings*, 135, 2017, 187-200, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.045>
- [20] Meng, X., Luo, T., Gao, Y., Zhang, L., Shen, Q., Long, E.: A new simple method to measure wall thermal transmittance in situ and its adaptability analysis, *Applied Thermal Engineering*, 122, 2017, 747-757, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.074>
- [21] Evangelisti, L., Guattari, C., Gori, P., Vollaro, R.: In Situ Thermal Transmittance Measurements for Investigating Differences between Wall Models and Actual Building Performance, *Sustainability*, 7, 2015, 10388, <https://doi.org/10.3390/su70810388>
- [22] Ficco, G., Iannetta, F., Ianniello, E., d'Ambrosio Alfano, F. R., Dell'Isola, M.: U-value in situ measurement for energy diagnosis of existing buildings, *Energy and Buildings*, 104, 2015, 108-121, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.071>
- [23] Rye, C., Scott, C.: The SPAB Research Report 1 e U-Value Report, in SPAB, London, November 2012, Published 2010 and revised
- [24] Meng, X., Yan, B., Gao, Y., Wang, J., Zhang, W., Long, E.: Factors affecting the in situ measurement accuracy of the wall heat transfer coefficient using the heat flow meter method, *Energy and Buildings*, 86, 2015, 754-765, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.005>
- [25] Gaspar, K., Casals, M., Gangoellés, M.: In situ measurement of façades with a low U-value: Avoiding deviations, *Energy and Buildings*, 170, 2018, 61-73, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.012>
- [26] Ahmad, A., Maslehuddin, M., Al-Hadhrani, L. M.: In situ measurement of thermal transmittance and thermal resistance of hollow reinforced precast concrete walls, *Energy and Buildings*, 84, 2014, 132-141, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.048>
- [27] Litti, G., Khoshdel, S., Audenaert, A., Braet, J.: Hygrothermal performance evaluation of traditional brick masonry in historic buildings, *Energy and Buildings*, 105, 2015, 393-411, [10.1016/j.enbuild.2015.07.049](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.049)
- [28] Gaspar, K., Casals, M., Gangoellés, M.: Review of criteria for determining HFM minimum test duration, *Energy and Buildings*, 176, 2018, 360-370, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.049>
- [29] International Organization for Standardization. Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance - Part 2: Infrared method for frame structure dwelling (ISO 9869-2:2018)
- [30] Meng, X., Gao, Y., Wang, Y., Yan, B., Zhang, W., Long, E.: Feasibility experiment on the simple hot box-heat flow meter method and the optimization based on simulation reproduction, *Applied Thermal Engineering*, 83, 2015, 48-56, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.03.010>
- [31] Andújar Márquez, J. M., Martínez Bohórquez, M. Á., Gómez Melgar, S.: A New Metre for Cheap, Quick, Reliable and Simple Thermal Transmittance (U-Value) Measurements in Buildings, *Sensors (Basel, Switzerland)*, 17, 2017, 10.3390/s17092017.
- [32] Bienvenido-Huertás, D., Rodríguez-Álvaro, R., Moyano, J.J., Rico, F., Marín, D.: Determining the U-Value of Façades Using the Thermometric Method: Potentials and Limitations, *Energies*, 11, 2018, 360, <https://doi.org/10.3390/en11020360>
- [33] Kim, S.H., Kim, J. H., Jeong, H. G., Song, K. D.: Reliability Field Test of the Air–Surface Temperature Ratio Method for In Situ Measurement of U-Values, *Energies*, 11, 2018, 803, <https://doi.org/10.3390/en11040803>
- [34] Janković, A., Antunović, B., Preradović, L.: Alternative Method for On Site Evaluation of Thermal Transmittance, *FACTA UNIVERSITATIS, Series Mechanical Engineering*, 15, 2017, 341-351, 10.22190/FUME170419017J

PROCJENA OPERATIVNIH TROŠKOVA ŠKOLA PRIMJENOM UMJETNIH NEURONSKIH MREŽA

ESTIMATION OF SCHOOLS OPERATING COSTS WITH THE APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Ksenija Tijanić¹, Diana Car-Pušić¹

(1) Sveučilište u Rijeci Građevinski fakultet, ksenija.tijanic@uniri.hr, diana.car.pusic@uniri.hr

Sažetak

Rad se bavi primjenom umjetnih neuronskih mreža u planiranju godišnjih operativnih troškova škola s područja Republike Hrvatske. U tu su svrhu prikupljeni podaci za 51 hrvatsku školu te razvijene tri različite umjetne neuronske mreže: višeslojni perceptron (MLP), mreža opće regresije (GRNN) i mreža s radijalno zasnovanom funkcijom (RBFNN). Softver koji se koristio za ove potrebe se naziva DTREG - Predictive Modeling Software. Usporedbom dobivenih rezultata pokazalo se da se najveća točnost procjene postiže primjenom GRNN mreže čiji je MAPE tijekom validacije 7,97%, a koeficijent determinacije 0,90. U ovom se slučaju GRNN mreža pokazala optimalnom za procjenu troškova. Za potrebe planiranja troškova u konkretnim slučajevima može se ispitati veći broj mrežnih modela što mogućnosti softvera dopuštaju bez većih problema. Rezultati ovog istraživanja ukazuju da GRNN daje dobre rezultate te je treba uzeti u obzir u budućim procjenama. U praksi se uvijek želi ostvariti što točniji financijski plan, pa je svaki doprinos povećanju točnosti, od značaja.

Ključne riječi: škole, godišnji operativni troškovi, umjetna neuronska mreža, DTREG

Abstract

The paper deals with application of artificial neural networks in planning of annual schools operating costs in the Republic of Croatia. For this purpose, data were collected for 51 Croatian schools, and three different artificial neural networks were developed: Multilayer perceptron (MLP), General regression neural network (GRNN), and Radial basis function neural network (RBFNN). Software used for this purpose is called DTREG - Predictive Modeling Software. Comparison of obtained results showed that the smallest error in the estimation of future cost values was given by the GRNN whose MAPE during the validation was 7,97% and the coefficient of determination was 0,90. In this case, the GRNN proved to be optimal for cost estimation. For cost planning in specific cases, several network models can be tested, which allows software capabilities without major problems. The results of this study indicate that GRNN is performing well and should be taken into account in future evaluations. In practice, there is a need to always accomplish as accurate financial plan as possible, therefore every contribution towards increasing its accuracy is of significance.

Keywords: schools, annual operating costs, artificial neural network, DTREG

1. Uvod

Objekte hrvatskog javnog sustava obrazovanja (škole) karakteriziraju značajni troškovi, kako u fazi izgradnje tako i u fazi korištenja (eksploatacije) objekata [1]. Troškove eksploatacije škola snosi javni sektor stoga je važno upravljati njima na pravi način pri čemu je u obzir potrebno uzeti i posebnosti škola u odnosu na građevine privatnog sektora kao što su: nulta diskontna stopa koja odražava posebnost građevina javnog sektora na koje se gleda kao na socijalne, a ne kapitalne projekte, dugi životni vijek projekata, mali ili nikakav prihod tijekom životnog vijeka [2].

Što točniji plan troškova u fazi eksploatacije škole (operativni plan troškova) daje uvid u raspodjelu proračuna te pomaže u kontroli i nadzoru tih troškova [3]. Operativni troškovi škole uz troškove za zaposlene, najvećim dijelom uključuju troškove tekućeg i investicijskog održavanja te troškove uporabe. Tekuće održavanje obuhvaća izvođenje radova koji se poduzimaju radi sprječavanja oštećenja koja nastaju uporabom građevine ili radi uklanjanja tih oštećenja. Sastoje se od pregleda, popravaka i poduzimanja preventivnih i zaštitnih mjera. Investicijsko održavanje obuhvaća izvođenje građevinsko-obrtničkih radova s ciljem poboljšanja uvjeta korištenja građevine u fazi korištenja građevine te vrlo često zahtjeva velika financijska sredstva [4]. Troškovi uporabe obuhvaćaju troškove režija, poreza, osiguranja i sl. [2].

Precjenjivanje ili podcjenjivanje operativnih troškova može negativno utjecati na odlučivanje o zadacima unutar škole koje treba obaviti, npr. odluke o aktivnostima održavanja, kao i spriječiti učinkovito korištenje proračuna [3].

U Republici Hrvatskoj se problematikom planiranja troškova eksploatacije bavio Krstić [2] koji je u okviru svoje doktorske disertacije razvio modele procjene godišnjih troškova 'uporabe' i 'održavanja i uporabe' zasnovane na regresijskoj analizi. Osnovno ograničenje njegovih modela je primjenjivost samo na fakultetske građevine Sveučilišta u Osijeku. Validacija modela izvršena je na građevini izvan Sveučilišta u Osijeku, te je dobivena pogreška u procjeni od 8,22%, odnosno 0,44%, ali kako je riječ samo o jednoj građevini, rezultati nisu reprezentativni. Za nastavak istraživanja ističe potrebu potvrde dobivenih rezultata provedenog istraživanja i ispitivanje primjenjivosti modela na većem uzorku fakultetskih građevina izvan Sveučilišta u Osijeku, kao i na građevinama slične namjene, kao što su npr. škole.

Pošto su u novije vrijeme neuronske mreže prepoznate kao vrlo dobar alat koji se može uspješno koristiti za prognostičko modeliranje u različitim inženjerskim područjima [5], autori ovog rada su primjenom istih pokušali stvoriti model koji će dati što preciznije rezultate u procjeni operativnih troškova škola. Primjenom neuronskih mreža i korištenjem baze podataka, brže bi se i preciznije procjenjivali budući troškovi [6].

Uvidom u financijske planove škola može se primijetiti da se oni izrađuju za naredna trogodišnja razdoblja pri čemu se za sve tri obračunske godine planiraju iste vrijednosti, stoga su ove procjene često vrlo neprecizne i netočne. Tijanić i sur. [7] ukazuju da su prekoračenja stvarnih operativnih troškova u odnosu na planirane u pojedinim školama i do 40%.

S obzirom na sve navedeno, cilj ovog rada je razviti model umjetne neuronske mreže koja će pomoći u planiranju stvarnih godišnjih operativnih troškova škola te dati što manju pogrešku u njihovoj procjeni.

Rad je nakon Uvoda, organiziran na sljedeći način: poglavlje 2 opisuje primijenjenu metodologiju te je prikazan razvoj modela umjetnih neuronskih mreža, poglavlje 3 daje opis i usporedbu rezultata te diskusiju, poglavlje 4 je zaključno poglavlje.

2. Primijenjena metodologija

Istraživanje u ovom radu sastoji se od prepoznavanja problema i cilja istraživanja, prikupljanja i analize podataka nakon čega su formirani različiti modeli neuronskih mreža, uspoređeni dobiveni rezultati, te odabran najtočniji model procjene. Podaci su prikupljeni za potrebe razvoja modela predviđanja stvarnih godišnjih operativnih troškova škola s područja Republike Hrvatske. Problem predstavlja nedovoljno precizno predviđanje spomenutih troškova, a cilj rada je razviti model koji će dati što manju pogrešku u njihovom predviđanju. Korišten je softver DTREG – Predictive

Modeling Software. DTREG je program za statističke analize koji ima mogućnost stvaranja različitih vrsta umjetnih neuronskih mreža te drugih tehnika predviđanja i donošenja odluka kao što su metoda potpornih vektora, programiranje genetičkim izrazom, različite vrste regresija, stabla odluka i sl. [8]. DTREG karakterizira samo-optimizacija odabranog modela predviđanja kako bi se dobila najmanja pogreška u procjeni budućih vrijednosti.

Prikupljeni podaci sadrže informacije o 51 osnovnoj i srednjoj školi s područja Republike Hrvatske, a obuhvaćaju godinu gradnje škole, unutarnju neto površinu, broj smjena, broj učenika i broj razrednih odjela za 2017./2018. školsku godinu, planirane te stvarno ostvarene operativne troškove za 2018. godinu.

Podaci su prikupljeni pretraživanjem internetskih izvora. Informacije o broju smjena, učenika i razrednih odjela preuzeti su s aplikacije "ŠeR - Školski e-Rudnik" [9] koja je nastala pod pokroviteljstvom Ministarstva znanosti i obrazovanja Republike Hrvatske. Godina gradnje i površina škole preuzeti su iz državnih revizija učinkovitosti za kapitalna ulaganja u osnovne i srednje škole po županijama [10]. Financijski podaci preuzeti su iz financijskih planova i izvješća koje svaka škola objavljuje na svojim internetskim stranicama.

2.1. Razvoj modela umjetnih neuronskih mreža

Procjena stvarnih godišnjih operativnih troškova škola izvršila se s tri vrste umjetnih neuronskih mreža: višeslojni perceptron (engl. Multilayer perceptron, MLP), neuronska mreža opće regresije (engl. General regression neural network, GRNN) te neuronska mreža s radijalno zasnovanom funkcijom (engl. Radial basis function neural network, RBFNN). Ove mreže sadržane su u korištenom softveru te se njihovom primjenom željela ispitati prikladnost različitih vrsta neuronskih mreža za procjenu operativnih troškova škola.

Umjetne neuronske mreže dio su umjetne inteligencije. S obzirom na arhitekturu i funkcije podsjećaju na moždane stanice i ljudski živčani sustav, uče iz iskustva te pouzdano pružaju odgovore na složene probleme [11].

MLP mreža se sastoji od ulaznog sloja, izlaznog sloja te jednog ili više skrivenih slojeva neurona. Najpoznatiji i najčešće upotrebljavani algoritam primijenjen na učenje i testiranje ovih mreža je algoritam s povratnom propagacijom pogreške (engl. Backpropagation algorithm) [12] koji je širi kroz mrežu od ulaznog do izlaznog sloja, a zatim određuje grešku i tu grešku propagira unazad sve do ulaznog sloja ugrađujući je u formulu za učenje.

GRNN mreža sastoji se od ulaznog sloja, skrivenog sloja (ili sloja uzoraka) i izlaznog sloja. Također postoji dodatni nevidljivi sloj za sumaciju/dijeljenje [13]. Pri treniranju ove mreže, ona pamti svaki jedinstveni obrazac podataka i ne zahtijeva iterativni postupak treninga kao što je slučaj u MLP mreži [14].

RBFNN mreža upotrebljava radijalno simetričnu i radijalno ograničenu prijenosnu funkciju u svom skrivenom sloju [15]. Sastoji se od ulaznog, skrivenog i izlaznog sloja neurona. Učenje mreže se odvija u dva koraka. Najprije se određuju težinski koeficijenti mreže od ulaznog do skrivenog sloja, a zatim od skrivenog do izlaznog sloja [16].

Nakon nekoliko iteracija u DTREG-u se najmanja greška u razvijenim modelima dobila upotrebom tri ulazne varijable:

- površina škole (m^2) (X_1),
- broj učenika 2017./2018. god. (X_2),
- planirani operativni troškovi za 2018. god. (X_3).

Izlazna varijabla su stvarni godišnji operativni troškovi za 2018. god (Y).

Pogreška u modelima je mjerena pomoću srednje apsolutne postotne pogreške (engl. Mean absolute percentage error, MAPE) te koeficijenta determinacije (R^2). Ove dvije veličine su najčešći procjenitelji točnosti modela predviđanja [16]. MAPE se definira formulom (1):

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum \left| \frac{\text{Stvarna vrijednost} - \text{Planirana vrijednost}}{\text{Stvarna vrijednost}} \right| (\%) \quad (1)$$

Koeficijent determinacije R^2 statistička je mjera koja provjerava opću prikladnost modela predviđanja, pokazuje koliko dobre podatkovne točke odgovaraju krivulji ili liniji. Vrijednosti R^2 pripadaju intervalu $[0,1]$ [17]. Model je reprezentativniji što je R^2 bliži jedinici.

3. Rezultati i diskusija

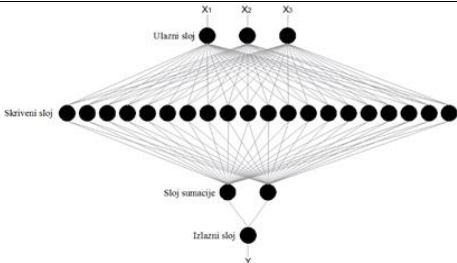
Performanse razvijenih modela neuronskih mreža prikazane su u Tablici 1.

Tablica 1. Usporedba performansi MLP, GRNN i RBFNN mreže

Parametri	MLP		GRNN		RBFNN	
	Trening	Validacija	Trening	Validacija	Trening	Validacija
R^2	0,96	0,91	0,97	0,90	0,96	0,76
MAPE	6,74%	8,86%	5,39%	7,97%	6,93%	10,74%
Trajanje analize	00:00.99		00:00.27		00:02.10	

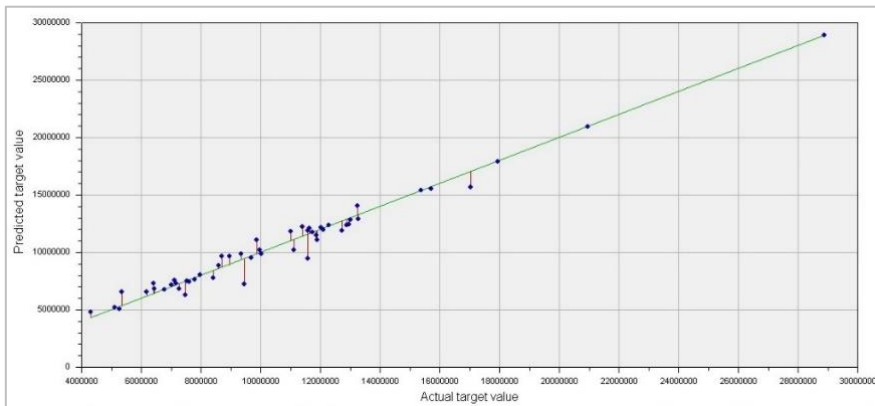
Gledajući MAPE kao glavnu mjeru točnosti modela, najbolji rezultat daje GRNN mreža čiji je MAPE najmanji i pri treniranju mreže i pri testiranju (validaciji), te je GRNN mreža prihvaćena kao najprikladniji model za predviđanje stvarnih godišnjih operativnih troškova škola. GRNN mreža također ima i najkraće vrijeme trajanja analize. Parametri razvijene GRNN mreže prikazani su u Tablici 2.

Tablica 2. Parametri razvijene GRNN mreže

Tip modela	Neuronska mreža opće regresije (GRNN)
Tip analize	Regresija
Broj neurona u modelu	Min. greška dogodila se s 26 neurona u modelu (20 u skrivenom sloju)
Optimizacija i pojednostavljenje modela	Ukloniti nepotrebne neurone, Smanjiti pogrešku, Ponovno obučiti nakon uklanjanja neurona
Testiranje i validacija modela	Unakrsna validacija – izostavljanje jednog primjera
Kako se nositi s vrijednostima koje nedostaju	Zamijeniti vrijednosti koje nedostaju s medijanima
Tip funkcije modela	Gaussova
Arhitektura mreže	

Arhitektura predstavlja specifičan raspored i povezanost neurona unutar neuronske mreže [18]. Razvijena GRNN mreža ima arhitekturu od 4 sloja, a optimalni broj neurona u skrivenom sloju je 20. Vrsta analize koja se provodi unutar mrežnog modela je regresijska analiza. Što se tiče testiranja i validacije modela, u DTREG-u za ovu operaciju postoje 4 izbora. Prva je ručni odabir određenih redaka iz ulaznog skupa podataka tijekom izrade modela. Druga opcija je odabir ukupnog postotka podataka iz ulaznog skupa podataka koji će se koristiti za validaciju, dok se

preostali postotak koristi za treniranje mreže. Treća metoda određivanja pogreške modela je k -unakrsna validacija kod koje se inicijalni skup podataka najprije po načelu slučajnog izbora podijeli u k međusobno različitih grupa približno iste veličine. Postupak je iterativan s tim da se u jednoj iteraciji $k-1$ grupa koristi kao skup za učenje, a razvijeni model se testira na preostaloj grupi koja predstavlja testni skup. Postupak se ponavlja k puta, tako da je svaka od grupa po jednom u ulozi testnog skupa. Specijalan slučaj metode unakrsne validacije je metoda validacije modela izostavljanjem jednog primjera. N je ukupan broj inicijalno dostupnih primjera podataka. Ako u svakoj od n iteracija izostavimo jedan primjer, model se razvija na osnovu $n-1$ primjera, a testira na jednom preostalim primjeru [19]. U ovom radu GRNN mreža je dala najmanju pogrešku provođenjem unakrsne validacije s izostavljanjem jednog primjera (engl. Leave one out, LOO). Odnos između stvarnih i predviđenih vrijednosti godišnjih operativnih troškova škola za GRNN mrežu prikazan je na Slici 2.



Slika 1. Odnos između stvarnih i predviđenih vrijednosti godišnjih operativnih troškova škola

Nakon razrade modela, predviđanje budućih vrijednosti operativnih troškova u DTREG-u se može obaviti opcijom "Prognoziranje budućih vrijednosti" (engl. Forecast future values).

Važno je naglasiti da umjetne neuronske mreže uče na ulaznim podacima, stoga njihova kvaliteta i količina izravno utječu na točnost modela, odnosno točnost procjene. U ovom radu se pokazalo da je odabir ulaznih varijabli vrlo bitan dio modeliranja s neuronskim mrežama. Najmanja pogreška u procjeni u ovom radu postigla se kada se u model ušlo s tri ulazne varijable (površina škole, broj učenika 2017./2018. god., planirani operativni troškovi za 2018. god.) te jednom izlaznom varijablom (stvarni operativni troškovi za 2018. god.). Ovisno o vrsti i strukturi podataka dostupnih za modeliranje bit će prikladan drugačiji tip prediktivnih modela pa se uvijek preporučuje isprobati par vrsta arhitekture neuronskih mreža kako bi se dobila najpreciznija predviđanja [20].

4. Zaključak

U ovom radu je istražena mogućnost primjene umjetnih neuronskih mreža za procjenu stvarnih godišnjih operativnih troškova škola u Republici Hrvatskoj. Kao obećavajući pristup koji daje vrlo malu pogrešku u procjeni budućih vrijednosti troškova se pokazala GRNN mreža. GRNN mreža razvijena u ovom radu dala je MAPE tijekom validacije od 7,97% te R^2 od 0,90. S obzirom na to da su podaci stvarni, model ima visoku točnost. Ovakav model nije zamjena detaljnom planiranju, ali bi mogao poslužiti računovodstvima škola pri izradi rebalansa proračuna za sljedeće obračunske godine. U praksi se uvijek želi ostvariti što točniji financijski plan, pa je svaki doprinos povećanju točnosti, od značaja. U budućim istraživanjima predlaže se stvaranje većih i homogenijih baza podataka o troškovima te razvijanje modela visokih točnosti za predviđanje troškova uporabe škola za duža vremenska razdoblja.

Literatura

- [1] Znanstveni projekt (2013-2018) Uspostava sustava odlučivanja baziranog na "performance" konceptu u upravljanju javnim društvenim objektima, broj potpore 13.05.1.3.10, voditelj: prof.dr.sc. Diana Car-Pušić
- [2] Krstić, H.: Model procjene troškova održavanja i uporabe na primjeru građevina Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Doktorska disertacija, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, 2011
- [3] Lee, A. i sur.: Building Maintenance Cost Planning and Estimating: A Literature Review, Proceedings of 34th Annual ARCOM Conference, Gorse, C., Neilson, C.J., Belfast, UK, Association of Researchers in Construction Management, 707-716, 2018
- [4] Stanovanje i održavanje zgrada, <http://stanovanje.gov.rs/latinica/odrzavanje-zgrade.php>, pristupljeno: 10.07.2019.
- [5] Lazarevska, M. i sur.: Application of artificial neural networks in civil engineering, Tehnički vjesnik, 21, 2014, 1353-1359
- [6] Naik, M.G., Radhika, V.S.B.: Time and cost analysis for highway road construction project using artificial neural networks, Journal of Construction Engineering and Project Management, 4, 2015, 26–31, DOI: 10.6106/JCEPM.2015.5.1.026
- [7] Tijanić, K. i sur.: Contribution to increasing the cost efficiency in the exploitation phase of public education facilities, Conference Proceedings of the 14th International Conference OTMC and the 7th IPMA Research Conference, Završki, I., Cerić, A., Vukomanović, M., Huemann, M., Ronggui, D., Zagreb, Republika Hrvatska, Hrvatska udruga za organizaciju građenja, 9-22, 2019
- [8] DTREG - Predictive Modeling Software, <http://www.dtreg.com>, pristupljeno: 15.07.2019.
- [9] ŠER - Školski e-Rudnik, <http://iro.hr/2018/10/23/ser-skolski-e-rudnik/>, pristupljeno: 15.07.2019.
- [10] Republika Hrvatska, Državni ured za reviziju: Izvješće o obavljenoj reviziji učinkovitosti kapitalnih ulaganja u osnovne i srednje škole na području Republike Hrvatske, 2018
- [11] Pewdum, W. i sur.: Forecasting final budget and duration of highway construction projects, Engineering, Construction and Architectural Management, 16, 2009, 44–557, doi.org/10.1108/09699980911002566
- [12] Jurković, Z., Marinković, R.: Izrada modela neuronskih mreža za učestalost korištenja fakultetske knjižnice, Ekonomski vjesnik, 25, 2012, 106-116
- [13] Edukacijski repozitorij za inteligentne sustave, <http://eris.foi.hr/11neuronske/nn-predavanje5.html>, pristupljeno: 16.07.2019.
- [14] Ghaderzadeh, M. i sur.: Comparing performance od different neural networks for early detection of cancer from benign hyperplasia of prostate, Applied Medical Informatics 33, 2013, 45-54
- [15] Zekić-Sušac, M., Musser, E.: Neuronske mreže u predviđanju ponude i potražnje prehrambenih proizvoda, Zbornik radova znanstvenog skupa „Kontinentalni gospodarski resursi u funkciji razvitka turizma Republike Hrvatske“, Marcel, M., Osijek, Republika Hrvatska, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Ekonomski fakultet Osijek, Institut za poljoprivredu i turizam Poreč, 275-294, 2010
- [16] RBFN: Introduction, <http://www.cs.bham.ac.uk>, pristupljeno: 10.07.2019.
- [17] Petruševa, S. i sur.: Predicting construction time by using general regression neural network, Conference proceedings of International Scientific Conference People, Buildings and Environment 4, Korytarova, J., Serrat, C., Hanak, T., Vankova, L., Luhačovice, Republika Češka, Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, 1805–6784, 2016,
- [18] Neural Networks, <http://solair.eunet.rs/~ilicv/neuro.html>, pristupljeno: 21.07.2019.
- [19] Novaković, J.: Rešavanje klasifikacionih problema mašinskog učenja, Fakultet tehničkih nauka u Čačku, 2013
- [20] Tijanić, K. i sur.: Cost estimation in road construction using artificial neural network, Neural Computing and Applications, Online First, 2019

KLIMATSKE PROMJENE I OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE – PREGLED STANJA U BOSNI I HERCEGOVINI

CLIMATE CHANGE AND RENEWABLE ENERGY SOURCES – REVIEW OF THE SITUATION IN BOSNIA AND HERZEGOVINA

Marin Brkić¹, Željko Rozić¹

(1) Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru, marin.brkic@gf.sum.ba, zeljko.rozic@gf.sum.ba

Sažetak

U radu je prikazan kratak osvrt na klimatske promjene u svijetu i BiH, te mogući utjecaji obnovljivih izvora energije na zaštitu okoliša. Brza i nagla globalizacija, postindustrializacija i hiperprodukcija, koje su prvenstveno bazirane na jakoj i koncentriranoj želji za profitom, su dovele do zagađenja i onečišćenja čovjekove okoline i okoliša generalno. Najveći problem predstavljaju plinovi kao što su ugljikov dioksid i metan, staklenički plinovi, koji stvaraju ogromne probleme u atmosferi kao i svim drugim negativnim pojavama vezanim za generalni sustav zaštite okoliša. Stoga je veoma bitno da se utvrdi udio pojedinih plinova u ukupnoj količini plinova kao i njihov pojedinačni „doprinos“ ukupnom zagađenju. Kao potpisnica mnogih međunarodnih ugovora i konvencija (Ugovora o uspostavljanju Energetske zajednice Jugoistočne Europe, Okvirnog sporazuma o klimatskim promjenama, Kyoto protokola, Espoo konvencije, itd.), BiH se obavezala na donošenje niza zakona vezanih za zaštitu okoliša i razvoj obnovljivih izvora energije.

Ključne riječi: klimatske promjene, obnovljivi izvori energije, staklenički plinovi, BiH

Abstract

This paper presents a brief review of climate change in the world and Bosnia and Herzegovina, as well as the possible impacts of renewable energy sources on environmental protection. Rapid and sudden globalization, postindustrialization and hyper-production, which are primarily based on a strong and concentrated desire for profit, have led to pollution and contamination of man's environment and the environment in general. The biggest problem are the gases such as carbon dioxide and methane, greenhouse gases, which create enormous problems in the atmosphere as well as any other negative phenomena related to the general environmental protection system. Therefore it is very important to determine the share of individual gases in the total quantity of gases as well as their individual "contribution" to total pollution. As a signatory to numerous international agreements and conventions (Treaty establishing the Energy Community of South Eastern Europe, the Climate Change Agreement, Kyoto Protocol, Espoo Convention, etc.), Bosnia and Herzegovina has committed itself to adapting a number of laws related to environmental protection and renewable energy sources.

Key words: climate change, renewable energy sources, greenhouse gases, BiH

1. Uvod

Premda šira javnost i znanstvenici nisu suglasni koliki je stvarni utjecaj čovjeka na klimatske promjene, neosporno je da je čovjek jedan od glavnih faktora koji je utjecao na klimu. Definirajući pojam klime, imamo sustav koji se sastoji od slijedećih dijelova: atmosfera, hidrosfera, kriosfera, biosfera i geosfera. To čini jedan iznimno napredan i složen sustav, koji usprkos istraživanjima sadrži u sebi veliki broj nepoznanica. Primarni izbor energije za sve klimatske procese u atmosferi je Sunce. Sve oscilacije aktivnosti Sunca koje se očituju kroz promjene u jačini Sunčevog toplinskog zračenja utječu na klimatske promjene na Zemlji. Sve klimatske promjene su usko vezane uz koncentraciju atmosferskog CO₂ (izgaranje fosilnih goriva). [1].

Prema dostupnim energetske proračunima, 10 milijuna tona nafte i 12 milijuna tona ugljena čovječanstvo potroši svaki dan, te 8 milijardi kubnih metara zemnog plina. [2]. Mnogi stručnjaci se slažu da postoji uska veza između industrijalizacije, koncentracije CO₂ i zagrijavanja Zemlje. Od otkrića parnog stroja prije oko 250 godina, čovjek je u atmosferu emitirao oko 2000 milijardi tona CO₂.

2. Klimatske promjene

Činjenica je da Zemlja postaje sve toplija. Srednja temperatura u prošleme stoljeću porasla je za 0,8°C. [1]. Ne samo da je 2016. godina bila najtoplija godina na svijetu od povijesti mjerenja, već je osam od dvanaest mjeseci koji čine godinu – od siječnja do rujna (iznimka lipanj) imalo te godine svoj toplinski rekord. Oceani su apsorbirali veći dio povećane topline. Od sredine prošloga stoljeća ocean do dubine od 700 metara bilježi zagrijavanje od 0,4°C.

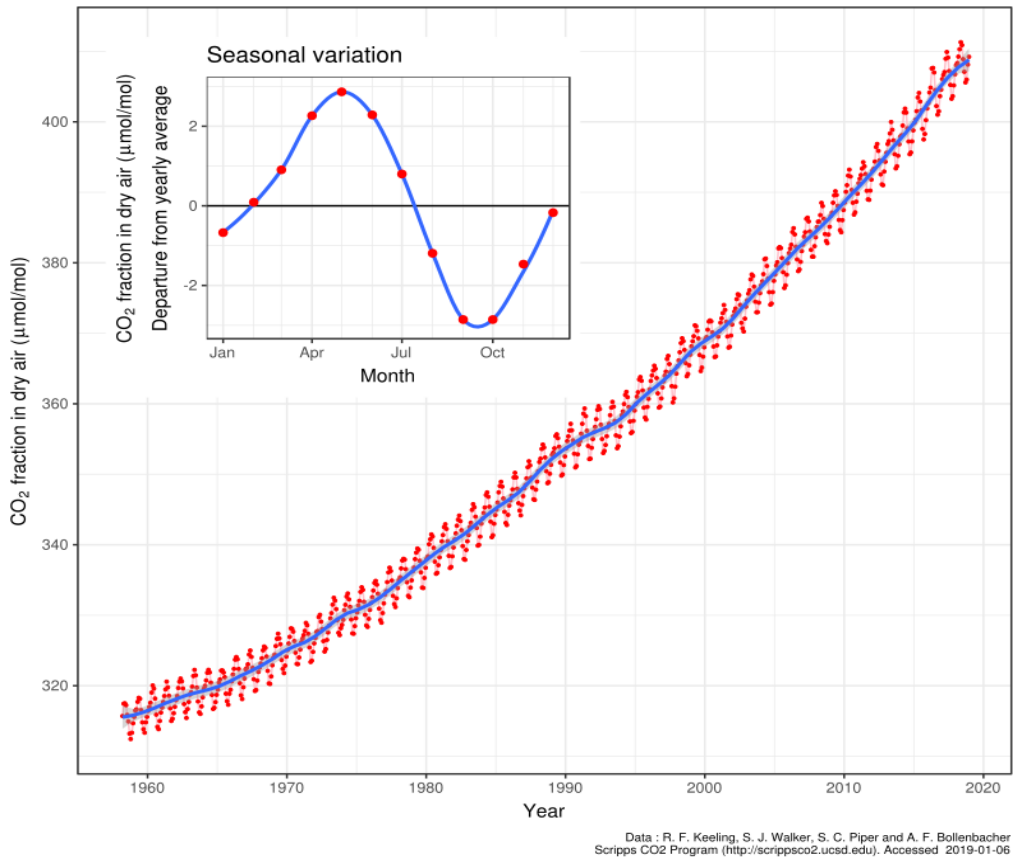
Činjenica je da su se grenlandski i antarktički ledeni pokrivači smanjili. Gubitak mase leda na Antartiku se utrostručio u posljednjem desetljeću. Topljenje ledenih pokrivača sa sobom povlači porast globalne razine mora, koja iznosi 8 inča u prošleme stoljeću. U posljednja dva desetljeća porast razine mora se skoro udvostručio u odnosu na prošlo stoljeće. Od početka industrijalizacije, kiselost mora se povećala za oko 30%. Količina CO₂ kojeg apsorbira gornji sloj oceana povećala se za oko 2 milijarde tona godišnje. [3].

Udio CO₂ u atmosferi je za vrijeme industrijalizacije porastao s 0,028% na 0,0387% (zapreminski). [1].

Na slici 1. prikazan je dijagram koncentracije CO₂ u atmosferu mjerene od 1958. godine [4]. Borba protiv klimatskih promjena je ključna točka zaštite okoliša Europske unije. Cilj Europske unije jest ograničiti globalno zagrijavanje na 2°C iznad prosječne razine temperature iz predindustrijskog doba. Europska unija se obvezala do 2020. godine smanjiti emisiju stakleničkih plinova za najmanje 20% ispod razina iz 1990. godine, a u isto vrijeme povećati energetske učinkovitost za 20% i udio obnovljivih izvora energije u ukupnoj potrošnji na 20%. [1].

Monthly mean CO₂ concentration

Mauna Loa 1958 - 2018



Slika 1. Keelingova krivulja koncentracije atmosferskog CO₂ mjerena u opservatoriju Mauna Loa, Havaji [4].

3. Posljedica klimatskih promjena u Bosni i Hercegovini

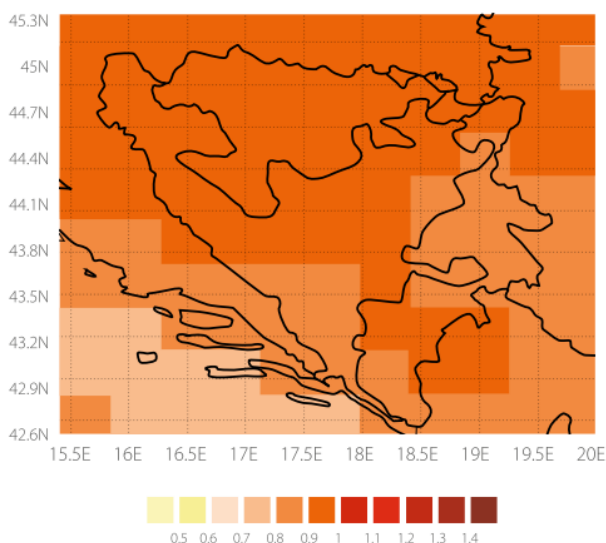
Iako se ponekad osporava, činjenica je da Bosnu i Hercegovinu nije zaobišao utjecaj klimatskih promjena. Na temelju komparative analiza za razdoblja 1981.-2010. i 1961.-1990., očituje se godišnji porast temperature zraka od 0,4°C do 0,8°C. [1].

Broj kišnih dana s padalinama iznad 1,0 milimetra je opao, dok je povećan broj dana s intenzivnim kišnim padalinama. [1].

U Inicijalnom nacionalnom izvješću za UNFCCC donesen je zaključak u kojem stoji kako je Bosna i Hercegovina zemlja koja je ranjiva na klimatske promjene. [5].

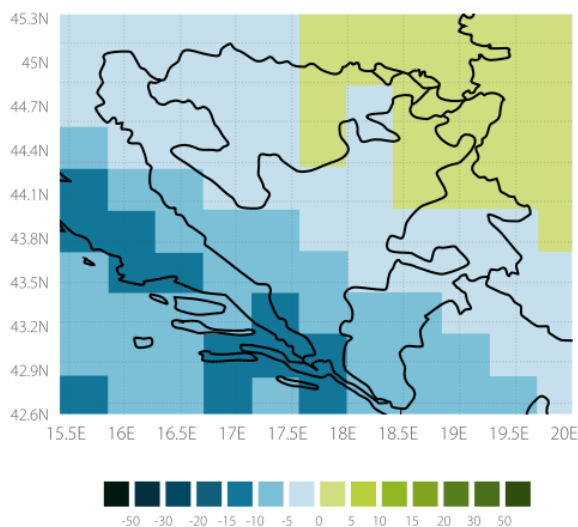
U svrhu daljnjeg predviđanja promjene temperature i padalina razvijena su dva globalna modela : SINTEX-G i ECHAM5. [6]. Oni ukazuju na porast srednje temperature po godišnjim dobima od +1°C do 2030. godine, dok se najveći porast očekuje tijekom ljeta od +1,4°C (lipanj-kolovoz). Ova dva modela prikazuju i promjene u vidu padalina. Očekuje se blagi rast padalina u središnjim planinskim dijelovima. [6].

Na slikama 2. i 3. vidimo projekcije budućih klimatskih promjena u vidu promjene godišnjih temperatura i godišnjih padalina.



Slika 2. Prognoza promjene godišnjih temperatura (°C) u Bosni i Hercegovini (2001.-2030.) [7].

Na godišnjem nivou promjena temperature se kreće u granicama od 0,8°C do 1°C s većim vrijednostima na sjevernom i zapadnom dijelu zemlje.



Slika 3. Prognoza promjene godišnjih padalina (%) u Bosni i Hercegovini (2001.-2030.) [7].

Promjena padalina na godišnjem nivou je negativna na cijelom teritoriju, od 0 do -10%, osim na području sjeveroistoka gdje je promjena pozitivna, i to do +5%.

Trenutno se predviđa između 2013.-2060. godine porast prosječne temperature za 2°C, što rezultira blažim zimama i toplijim ljetima (maksimalne ljetne temperature će rasti za 5°C).

Ljetne kišne padaline (lipanj-kolovoz) gotovo će se prepоловити, dok će učestalost ekstremnih događaja biti veća (suše, poplave, grad i jaki vjetrovi).

Predviđa se da će utjecaj klimatskih promjena na poljoprivredni sektor uglavnom biti negativan. To može biti veliki udarac za zemlju kojoj veliki udio u gospodarstvu otpada na primarni sektor. [1].

4. ZAKLJUČAK

Sve mjere i smjernice protiv klimatskih promjena su ključne akcije i ciljevi za zaštitu okoliša Europske unije. Generalni cilj Europske unije jest ograničiti globalno zagrijavanje na razinu temperature iz predindustrijskog doba. Europska unija se obvezala smanjiti emisiju stakleničkih plinova, a u isto vrijeme povećati energetske učinkovitost i udio obnovljivih izvora energije u ukupnoj potrošnji.

Ipak se, kao konačni zaključak, mora istaknuti kako se klima mijenja i na Zemlji globalno postaje toplije, a s velikom vjerojatnošću se može reći da je i čovjek djelomično odgovoran za promjenu klime. Čak i ako IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) višestruko pretjeruje u svojim prognozama, dijelom iz ideoloških razloga, dijelom iz želje za svjetlima pozornice, ipak ima sasvim dovoljno podataka da se čovjek zabrine za budućnost svog potomstva. Nažalost, oni koji donose najbitnije odluke, a to je politika, još nisu našli i funkcionalan način za usporavanje klimatskih promjena.

Kao potpisnica mnogobrojnih međunarodnih ugovora i konvencija (Ugovora o uspostavljanju Energetske zajednice Jugoistočne Europe, Okvirnog sporazuma o klimatskim promjenama, Kyoto protokola, Espoo konvencije, itd.), BiH se obavezala na donošenje niza zakona vezanih za zaštitu okoliša i razvoj obnovljivih izvora energije. Iako BiH nema strategiju razvoja obnovljivih izvora energija, strategiju zaštite okoliša, ali ni zakone vezane za energetske efikasnost, ipak je dosta urađeno vezano za ovaj značajan i globalni problem. Vijeće ministara Bosne i Hercegovine je usvojilo Strategiju prilagođavanja na klimatske promjene i niskoemisijskog razvoja Bosne i Hercegovine, koja identificira mjere za prilagođavanje klimatskih promjena u područjima energije, transporta i poljoprivrede, te drugim područjima (biodiverzitet, šumarstvo, turizam, voda, zdravlje stanovništva i zgradarstvo), kao i mjere za ublažavanje na klimatske promjene. Definirane su i potrebe za izgradnjom kapaciteta, što osigurava stratešku i programsku osnovu za efektivnu međunarodnu podršku.

Sve što radimo, gradimo u okolišu ima za posljedicu određeni utjecaj i određene promjene u okolišu, jer sva umjetna tvorevina unutar ekosustava više ili manje mijenja uvjete staništa, odnosno utječe na promjenu ekoloških činilaca. Pitanje je samo kako te utjecaje smanjiti, svesti na minimum ili poboljšati, odnosno pretvoriti ih u pozitivne utjecaje u kontekstu šire društveno ekonomske zajednice. U pojedinim slučajevima graditelji ne samo da pokušavaju zaustaviti neželjene promjene, već i poboljšati sadašnje stanje. Takvi graditeljski zahvati doprinose zaštiti i očuvanju prirodnog okoliša.

Generalno rješenje se nalazi u pristupu (graditi ono što je potrebno, ali razumno (racionalno)). Graditeljstvo je veoma složena i kompleksna djelatnost koja započinje još od donošenja strateških odluka o razvoju cijelih područja, odnosno država, pa preko njihovog unošenja u prostorne planove te dalje kroz pravne i upravne postupke do neposrednog izvođenja građevina. Od same zamisli do konačnog ostvarenja i predaje na korištenje nužno je da svaki građevinski projekt bude cjelovit i svrhovit, ali i usmjeren na očuvanje i, svakako, unapređenje okoliša. Pogreške s neželjenim posljedicama za čovjekov okoliš nastaju ne samo zato što je nešto (učinjeno), već i vrlo često jer (nije učinjeno). [8].

Literatura

- [1] Zovko, M., Rozić, Ž., Mandić, Z.: Uvod u okolišno-održivi razvoj, Grafotisak d.o.o. Grude, 2016. godina, ISBN 978-9958-16-064-6, broj stranica (159 – 180)
- [2] Gunther, H.: Der Energiemix im 21. Jahrhundert, 2010 godina
- [3] Nasa – global climate change, link (<https://climate.nasa.gov/evidence/>), pristupljeno: 17.07.2019.
- [4] Wikipedia – klimatske promjene, link (https://hr.wikipedia.org/wiki/Klimatske_promjene), pristupljeno: 17.07.2019.
- [5] Prvi nacionalni izvještaj (INC) o klimatskim promjenama, Vijeće ministara BiH, 2012. godina
- [6] UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) Bosnia & Herzegovina, link (http://www.unfccc.ba/en/site/pages/ranjivost_prilagodjavanje.php), pristupljeno: 10.09.2019.
- [7] Drugi nacionalni izvještaj (SNC) o klimatskim promjenama, Vijeće ministara BiH, 2013. godina
- [8] Vuković, Ž.: Zaštita okoliša, Sveučilište u Zagrebu, 2018. godina

POZVANO PREDAVANJE

DINAMIČKA KARAKTERIZACIJA LJULJANJA UREĐENIH BLOKOVSKIH SUSTAVA

DYNAMIC CHARACTERISATION OF ROCKING ORDERED BLOCKY SYSTEMS

Nina Čeh

Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, nina.ceh@uniri.hr

Sažetak

Ljuljanje predstavlja važan doprinos dinamičkom odgovoru diskontinuiranih sustava, poput spomenika, suhozida, grafitnih blokova u AGR nuklearnim elektranama, ali i zidanih konstrukcija nakon popuštanja veziva. Ovdje je analitičkim, numeričkim i eksperimentalnim pristupom istraženo ljuljanje. Ponovno su izvedene jednačbe kretanja za ljuljanje jednog krutog bloka i stupca od dva kruta bloka uslijed pobude podloge. Jednačbe su diskretizirane Newmarkovom numeričkom integracijom te riješene u geometrijski nelinearnom obliku Newton-Raphsonovom iterativnom metodom. Osmišljen je i proveden niz laboratorijskih eksperimenata slobodnog i prinudnog ljuljanja aluminijskih blokova za cijeli niz vitkosti i nekoliko različitih veličina, čime je istražen efekt skale/veličine i efekt vitkosti na njihov dinamički odgovor. Posebno važan mehanizmu kod ljuljanja je disipacija energije, koja se većim dijelom događa u sudaru između koja se ljuljaju. Numeričkim simulacijama je pokazano kako vitkost i veličina blokova utječu na disipaciju energije i dinamičku stabilnost blokova, te je isti utjecaj eksperimentalno validiran.

Ključne riječi: ljuljanje, dinamika krutih tijela, dinamička stabilnost, potresna platforma, optičko mjerenje

Abstract

Rocking gives an important contribution to dynamic response of discontinuous systems, such as monuments, dry-stone walls, graphite blocks in AGR nuclear-power plants, as well as masonry structures after failure of the binder. Rocking is here investigated analytically, numerically and experimentally. Equations of motion for rocking of a single rigid block and a stack of two rigid blocks are derived again. They are discretized using Newmark's numerical integration and solved in geometrically nonlinear form using Newton-Raphson iterative method. A series of laboratory experiments of free and forced rocking of aluminium blocks is designed and conducted for a range of slendernesses and various sizes, enabling us to investigate the size and slenderness effect to its dynamic response. Energy dissipation, which mainly takes part during impacts between rocking bodies, is a vital mechanism in rocking. Numerical simulations showed how the slenderness and size of the blocks affect the energy dissipation and the dynamic stability, which is also validated experimentally.

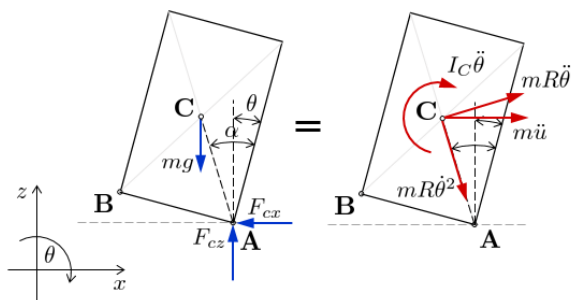
Keywords: rocking, dynamics of rigid bodies, dynamic stability, seismic platform, optical measurement

1. Uvod

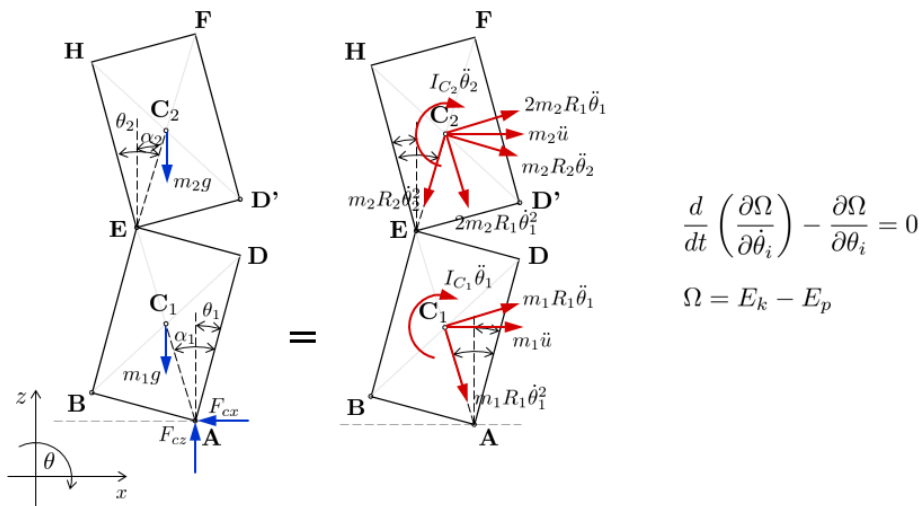
Ljuljanje krutih tijela predstavlja važan dio doprinosa dinamičkom odazivu diskontinuiranih sustava, poput spomenika, suhozida, grafitnih blokova u AGR nuklearnim elektranama, ali i zidanih konstrukcija nakon popuštanja veziva, na potresnu pobudu podloge na kojoj se nalaze. S obzirom da ljuljanje krutih tijela nije povezano s parametrima poput krutosti ili vlastite frekvencije sustava, a koji bi omogućili procjenu dinamičkog odgovora takvih tijela unaprijed, ovdje je istraženo to ponašanje analitički, numerički i eksperimentalno [1], [2].

2. Jednadžbe kretanja

Ljuljanje je promatrano analitički, tako da su ponovno izvedene jednadžbe kretanja za ljuljanje jednog krutog bloka (Slika 1) te stupca od dva kruta bloka na krutoj podlozi (Slika 2) uslijed pobude podloge u obliku funkcije ubrzanja [1].



Slika 1. Dijagram slobodnog tijela i dijagram masa*ubrzanje za ljuljanje krutog bloka [1]

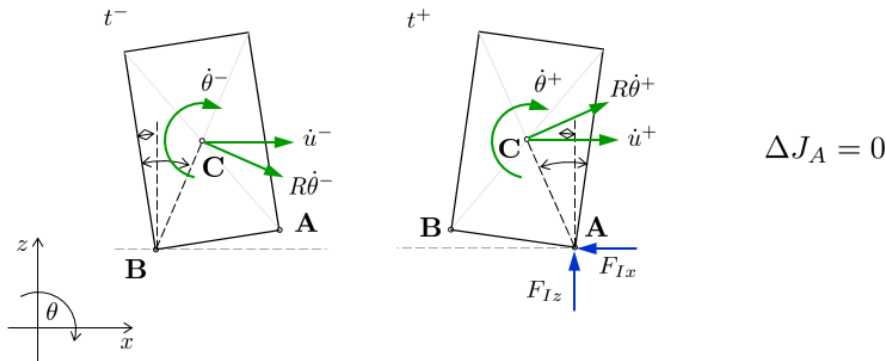


Slika 2. Dijagram slobodnog tijela i dijagram masa*ubrzanje za ljuljanje stupca od dva kruta bloka [1]

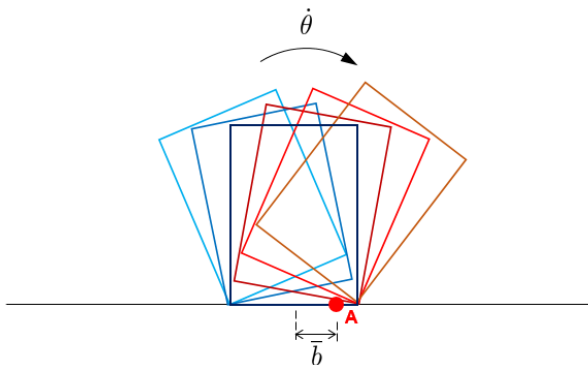
Jednadžbe su linearizirane za slučaj ljuljanja blokova proizvoljne geometrije u području malih rotacija, a zatim za slučaj ljuljanja vitkih blokova u području malih rotacija. Za pojedine slučajeve pobude podloge su pronađena analitička rješenja lineariziranih jednadžbi kretanja [1].

3. Gubitak energije

Tijekom ljuľanja se prilikom svakog prelaska iz rotacije oko jednog ugla bloka u rotaciju oko drugog ugla bloka događaa sudar između tijela (sudar između bloka i podloge ili sudar između dva bloka kod stupca od više blokova), prilikom kojeg se gubi određan količina energije. Taj gubitak energije je definiran koeficijentom restitucije. S obzirom da je ljuľjanje ne-konzervativni mehanički problem, dio energije se iz sustava gubi i kada ne promatramo utjecaj disipacije energije uslijed trenja, deformacija tijela itd. Taj dio energije se može izraziti koristeći pretpostavku da prilikom sudara bloka s podlogom rezultantni impuls djeluje u točki koja predstavlja novi centar rotacije (neposredno nakon sudara), a koja se može nalaziti na samom rubu baze bloka [3] (Slika 3), ali i negdje drugdje na bazi bloka [4], [5] (Slika 4).



Slika 3. Plan brzina krutog bloka neposredno prije i odmah nakon sudara s podlogom na kojoj se ljuľja [1], [3]



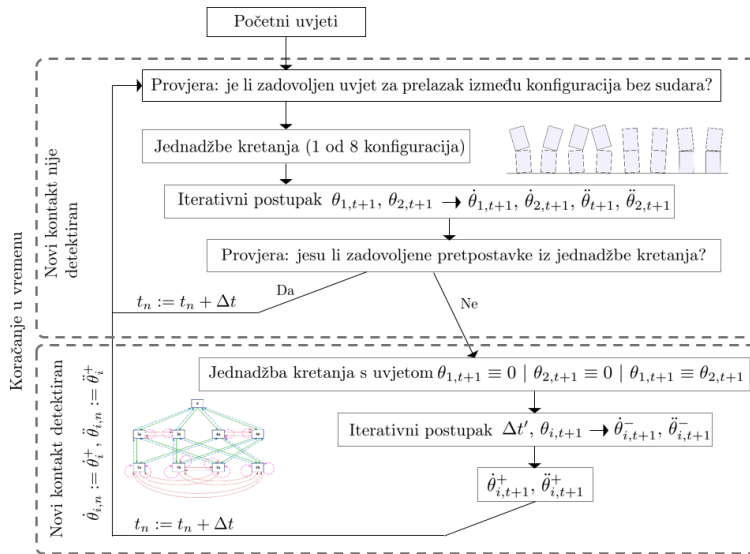
Slika 4. Položaj djelovanja rezultantnog impulsa prilikom sudara [4], [5]

Potonja situacija bolje opisuje većinu praktičnih situacija ljuľjanja, no u takvom opisu sudara se javlja nova nepoznanica – položaj točke u kojoj djeluje rezultantni impuls. Na temelju razvijene i provedene dvije serije eksperimenata s različito fizikalno modeliranim kontaktima je razvijen i prikazan postupak kojim se može procijeniti položaj te točke, odnosno odrediti koeficijent restitucije za blokove različitih veličina i vitkosti [6].

4. Algoritam

Nelinearne i linearizirane jednadžbe kretanja su zatim diskretizirane i rješene u programskom jeziku Matlab kroisteći Newmarkovu metodu numeričke integracije, dok su rješenja nelinearnih

jednadžbi kretanja u pojedinom vremenskom koraku dobivena koristeći Newton-Raphsonovu metodu iteracije. Usporedba rezultata numeričkih simulacija provedenih koristeći nelinearnu i lineariziranu jednadžbu kretanja je pokazala da je u općenitom slučaju za proizvoljnu geometriju blokova i pobudu podloge potrebno kositi geometrijski potpuno nelinearne jednadžbe kretanja.



Slika 5. Prikaz algoritma za simulaciju ljuľanja stupca od dva bloka na krutoj podlozi [1], [6]

5. Eksperimentalna ispitivanja

Nekoliko serija eksperimentalnih ispitivanja je osmišljeno, dizajnirano i provedeno s ciljem boljeg razumijevanja ljuľanja, dobivanja točnijih parametara koji opisuju gubitak energije te definiranja uvjeta koji rezultiraju stabilnim ljuľanjem i uvjeta koji rezultiraju prevrtanje tijekom ljuľanja (a samim time i kolaps sustava). Također, dokumentirani eksperimentalni rezultati služe kao benchmark primjeri za validaciju postojećim platformi za numeričku simulaciju.

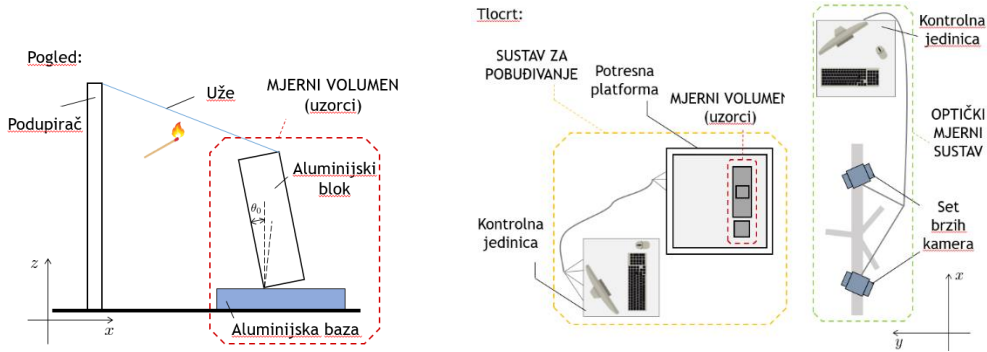
5.1. Eksperimentalni postav

Eksperimenti su provedeni u Laboratoriju za konstrukcije Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci koristeći sustav od dvije brze kamere za optičko beskontaktno mjerenje pomaka i deformacija GOM Aramis 3D 4M i dvoosne potresne platforme Quanser STI-III za nanošenje pobude na bazu (Slika 6).

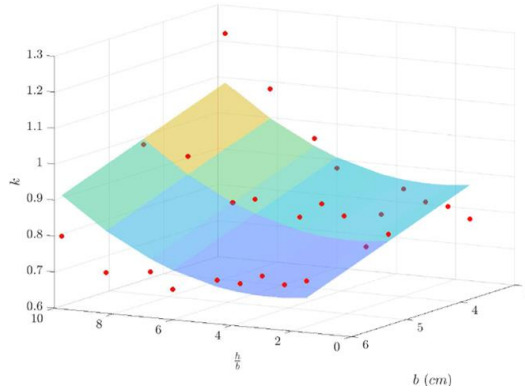
5.2. Rezultati ispitivanja

Niz ispitivanja slobodnog ljuľanja blokova (Slika 6, lijevo) različitih veličina i vitkosti u kombinaciji s numeričkim simulacijama je omogućio dobivanje parametra k koji opisuje položaj točke u kojoj djeluje rezultatni impuls [4], [6] ovisno o veličini i vitkosti bloka (Slika 7).

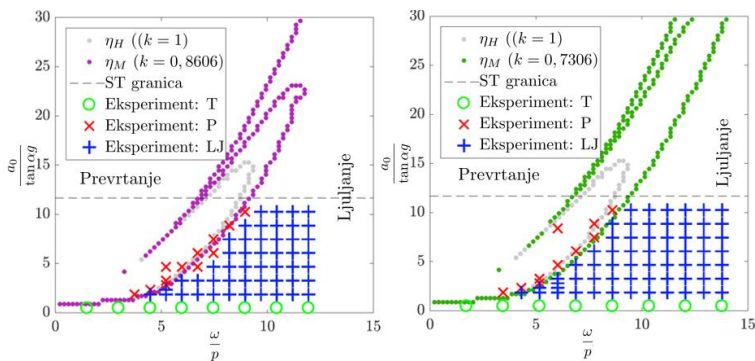
Uvede li se to u numeričke simulacije moguće je dobiti područja stabilnog ljuľanja i prevrtanja bloka uslijed pobude podloge u obliku jednog vala sinusoidalnog ubrzanja (amplitude a i frekvencije ω). Tako dobivena područja stabilnosti su eksperimentalno validirana za odabrane uzorke blokova (Slika 7) i stupca od dva bloka (Slika 8).



Slika 6. Postav eksperimenta za slobodno ljuľanje (lijevo) i prikaz opreme za nanošenje pobude i mjerenje (desno) [1], [6]

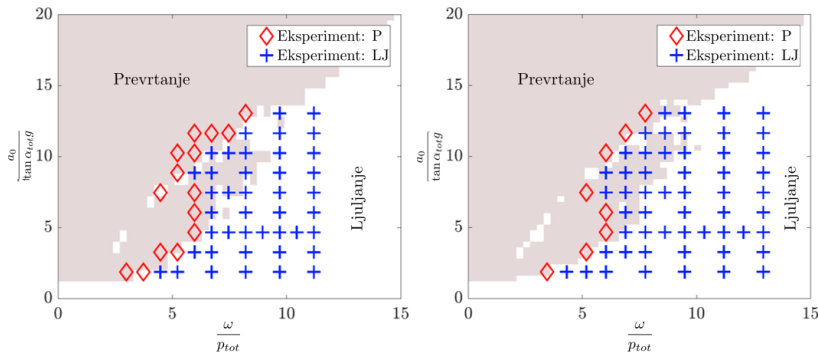


Slika 7. Koeficijent k koji definira položaj točke u kojoj djeluje rezultantni impuls ovisno o veličini b i vitkosti h/b bloka [6]



Slika 8. Eksperimentalno i numerički dobiven dinamički odgovor krutog bloka vitkosti 4,5 na pobudu podloge u obliku jednog vala sinusoide [1]

Za stupac od dva bloka su numerički rezultati većim dijelom eksperimentalno validirani, no potrebno je dodatno istražiti mehanizam gubitka energije.



Slika 9. Eksperimentalno i numerički dobiven dinamički odgovor stupca od dva kruta bloka ukupne vitkosti 4,5 na pobudu podloge u obliku jednog vala sinusoide [1]

6. Zaključci i nastavak istraživanja


Pokazan utjecaj veličine i vitkosti blokova na gubitak energije tijekom ljuljanja, a samim time i na njihovu dinamičku stabilnost. U nastavku će se istraživati dinamički odgovor blokova na drukčije pobude (poput potresne) i potpuno ili djelomično prevrtanje stupaca od više blokova. Također, istraživanje se planira usmjeriti u simulaciju ljuljanja pomoću metode diskretnih elemenata, a eksperimentalno u detaljnije definiranje mehanizma gubitka energije. Naknadno bi trebalo razviti algoritme koji uzimaju u obzir 3D rotacije te deformabilnost podloge i blokova.

Zahvala

Istraživanje je provedeno u sklopu projekata *Evidence-based characterisation of dynamic sensitivity for multi-block structures - Computational simulation and experimental validation* (UKF 3/13, 2013-2015), *Configuration-dependent approximation in non-linear finite-element analysis of structures* (CANFAS, HRZZ-IP-11-2013-1631, 2015-2019), *Ljuljanje krutog bloka na elastičnoj konstrukciji – pristup metodom neuglatke kontaktne dinamike i eksperimentalna provjera* (DAAD, hrvatsko-njemački bilateralni, 2019-2020) i *Collisions in rocking multi-body systems – experimental and numerical investigation* (UKF, 2019), a korištena oprema je nabavljena u sklopu projekta RISK (*Research Infrastructure for Campus-based Laboratories at the University of Rijeka*, RC.2.2.06-0001).

Literatura

- [1] N. Čeh, "A Contribution to Dynamic Characterisation of Ordered Blocky Systems," University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering in Rijeka, 2018.
- [2] N. Čeh *et al.*, "Dynamic sensitivity of multi-block stacks subjected to pulse base excitation - Experimental evidence and non smooth contact dynamics simulations," in *COMPdyn 2015 - 5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, 2015.
- [3] G. W. Housner, "The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 53, no. 2, pp. 403–417, 1963.
- [4] D. Kalliontzis, S. Sritharan, and A. Schultz, "Improved Coefficient of Restitution Estimation for Free Rocking Members," *J. Struct. Eng.*, vol. 142, no. 12, 2016.
- [5] M. N. Chatzis, M. Garcia Espinosa, and A. W. Smyth, "Examining the Energy Loss in the Inverted Pendulum Model for Rocking Bodies," *J. Eng. Mech.*, vol. 143, no. 5, 2017.
- [6] N. Čeh, G. Jelenić, and N. Bičanić, "Analysis of restitution in rocking of single rigid blocks," *Acta Mech.*, vol. 229, no. 11, pp. 4623–4642, Nov. 2018.



ISBN 978-953-6953-51-6

**<https://zt2019.uniri.hr/>
Rijeka, 2019.**