

12. SIMPOZIJ DOKTORSKOG STUDIJA GRAĐEVINARSTVA

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet
24. rujna 2026.

Zbornik radova

urednica
ANA BARIČEVIĆ

ISBN 978-953-8168-89-5



Izdavač

Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
Fra Andrije Kačića-Miošića 26
10000 Zagreb

Urednica

izv. prof. dr. sc. Ana Baričević

Dizajn naslovnice

minimum d.o.o.

Prijelom

Tanja Vrančić

ISBN

ISBN 978-953-8168-89-5

DOI

<https://doi.org/10.5592/CO/PhDSym.2026>
Zagreb, rujan 2026.

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.

12. SIMPOZIJ DOKTORSKOG STUDIJA GRAĐEVINARSTVA

24. rujna 2026., Zagreb

Zbornik radova

Urednica

Ana Baričević

Organizacijski odbor simpozija

izv. prof. dr. sc.	Ana Baričević	Prodekanica za znanost
izv. prof. dr. sc.	Mario Bačić	Zavod za geotehniku
izv. prof. dr. sc.	Gordon Gilja	Zavod za hidrotehniku
prof. dr. sc.	Davor Skejić	Zavod za konstrukcije
izv. prof. dr. sc.	Kristina Ana Škreb	Zavod za matematiku
izv. prof. dr. sc.	Marijana Serdar	Zavod za materijale
prof. dr. sc.	Mladen Vukomanović	Zavod za organizaciju, tehnologiju i menadžment
izv. prof. dr. sc.	Ivo Haladin	Zavod za prometnice
izv. prof. dr. sc.	Marina Frančić Smrkić	Zavod za tehničku mehaniku
izv. prof. art. dr. sc.	Silvio Bašić	Samostalna Katedra za zgradarstvo

Predgovor

Simpozij doktorskog studija Građevinskog fakulteta, utemeljen 2015. godine, tijekom godina razvio se u prepoznatljivu platformu za okupljanje mladih istraživača, razmjenu znanja i promicanje znanstvene izvrsnosti. Pokrenut s ciljem razvoja istraživačkih kompetencija, usvajanja znanstvene metodologije i jačanja kritičkog mišljenja doktoranada, Simpozij je tijekom jedanaest dosadašnjih izdanja okupio brojne mlade znanstvenike te omogućio predstavljanje više od 170 doktorskih istraživanja.

Dvanaesto izdanje Simpozija nastavlja ovu tradiciju, istodobno otvarajući prostor za nove ideje, interdisciplinarni dijalog i razmjenu iskustava. Program započinje radionicom *Research Pitch – How to Effectively Present Your Research*, koju vode izv. prof. dr. sc. Davor Bojanjac i dr. sc. Filip Turčinović. Cilj radionice jest unaprijediti vještine znanstvene komunikacije doktoranada i pripremiti ih za uspješno predstavljanje vlastitih istraživanja.

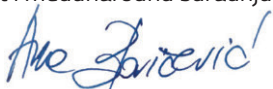
Uvodni dio programa obuhvaća panel raspravu *The Things No One Tells You About a PhD* te predavanje dr. sc. Irine Stipanović *Research Beyond Academia*. Ovi sadržaji pružaju različite perspektive o doktorskome obrazovanju i istraživačkoj karijeri te ukazuju na mogućnosti profesionalnog razvoja unutar i izvan akademske zajednice.

Središnji dio Simpozija čine usmena izlaganja doktoranada, tijekom kojih će predstaviti rezultate svojih dosadašnjih istraživanja i raspraviti ih s kolegama, mentorima i nastavnicima. Ova izlaganja predstavljaju temelj Simpozija jer potiču znanstvenu raspravu i razmjenu ideja koje pridonose daljnjem razvoju istraživanja te stručnom i znanstvenom sazrijevanju doktoranada. Program će biti zaključen predavanjem dr. sc. Lucije Stepinac *From a Research Idea to a Successful Startup*, koje će predstaviti mogućnosti transformacije znanstvenih spoznaja u inovativne poduzetničke pothvate.

Pred vama je knjiga radova koja okuplja istraživanja doktoranada koja će biti predstavljena na 12. Simpoziju doktorskog studija Građevinarstvo. Zahvaljujemo svim doktorandima, mentorima, predavačima i sudionicima na doprinosu organizaciji i radu Simpozija te svima želimo uspješan i sadržajan 12. Simpozij doktorskog studija.

U ime organizacijskog tima,

Prodekanica za znanost i međunarodnu suradnju


Ana Baričević, izv. prof. dr. sc.

Zagreb, kolovoz 2026.

Sadržaj

Predgovor	5
Training AI algorithms for remote sensing monitoring of geotechnical structures using large-scale synthetic data Lou Lerren Curacha, Irina Stipanović, Meho Saša Kovačević, Mario Bačić	9
A value of information framework for offshore wind site investigations Leon Kučinić, Irina Stipanović, Ken Gavin, Mario Bačić	19
Fragility curves as a basis for dynamic early warning thresholds for geotechnical structures Iva Mejašić, Irina Stipanović, Meho Saša Kovačević	28
Decision making framework through digital twin for lifecycle management of tunnel in Karst Mohammadhamed Mozafarian, Irina Stipanović, Kenneth Gavin, Mario Bačić, Meho Saša Kovačević	36
RoboRAIL: istraživački okvir za razvoj robotskog IoT sustava za nadzor stanja željezničke infrastrukture Luka Pušić, Danijela Jurić Kačunić, Mario Bačić, Lovorka Librić, Meho Saša Kovačević	46
Pregled modeliranja valova na Jadranu Lovro Štefan, Damjan Bujak	53
Potpuno održivi elementi drvenih konstrukcija od tvrdog drva Jelena Galić, Vlatka Rajčić	59
Analitički model poprečnog presjeka pravokutnih armiranobetonskih stupova s čeličnom ili GFRP uzdužnom armaturom pri ekscentričnom tlačnom opterećenju Florim Istrefi, Tomislav Kišiček	69
Analitički model duktilnosti GFRP-armiranih betonskih greda s tlačnim područjem ovijenim otvorenim GFRP 2U sponama Xhemshir Mulliqi, Tomislav Kišiček	77
Adaptive self-balancing guyed mast systems Vadym Nesterov, Ivan Čurković	84
Priključci s vijcima u navojnim rupama izrađenim u čeličnim elementima standardne i visoke čvrstoće Marko Ptiček, Davor Skejić	94
Dugotrajna svojstva niskougljičnog betona s dodatkom pepela drvne biomase Marija Mendeš, Nina Štirmer	101
Analiza korištenih procedura rješavanja sporova u projektima gradnje Ines Pean, Mladen Vukomanović	108
Uloga BIM-a u stvaranju ekonomske, organizacijske i održive vrijednosti za SME-ove u građevinskom sektoru Daša Salvezani, Mladen Vukomanović, Lana Lovrenčić Butković	117

Integracija nerazornih ispitivanja i strojnog učenja u sustav gospodarenja kolnicima Iva Brkić, Josipa Domitrović	125
--	-----

Pojačanje fasadnih zidanih zidova čeličnim okvirima Hrvoje Vukić, Marko Bartolac, Josip Galić	133
--	-----

Izvjешća o provedenom dodatnom obrazovanju i usavršavanju zaposlenika

“Mass Timber Seminar International 2025” u Cortacciji Nikola Perković	142
--	-----

“6 th Infrastar Training School on Fatigue and Reliability Analysis of Structures - Training for Assessment of Risk” u Nantes-u Bruno Zdravec	143
---	-----

“Generating Functions, Applications of the theory of inequalities and related areas” na Sveučilištu Akdeniz, Antalija Dora Pokaz	144
---	-----

“HiMASS Summer School 2025 – Heritage Masonry: Materials, Analysis and Structural Safety” u Oristanu, Sardinija Elizabeta Šamec	145
--	-----

“EUROCORR 2025 – Corrosion Summer School” u Stavangeru, Norveška Katarina Vranešić	146
---	-----

„Sustainable Project Management Training Session” u Milanu Kristijan Robert Prebanić	147
---	-----

Sažeci obranjenih doktorskih radova u razdoblju rujan 2025. – srpanj 2026.

Istraživanje ponašanja okvira od armiranoga betona s nadograđenim katom, s naglaskom na spoj između nadogradnje i postojeće konstrukcije pod seizmičkim opterećenjem dr. sc. Alush Shala	150
---	-----

Pouzdanost spregnutoga međukatnoga sustava čelik-beton izvedenoga od hladno oblikovanih sastavljenih čeličnih elemenata dr. sc. Andrea Rajić	151
---	-----

Pouzdanost posmične veze kod spregnutog sustava izvedenog od hladno oblikovanog čelika i betona dr. sc. Vlaho Žuvelek	152
--	-----

Procjena pouzdanosti uzdužno zavarenih aluminijskih elemenata izloženih osnom tlaku dr. sc. Ivan Čudina	153
--	-----

Doprinos vjetra izmjeni mora u marini s ugrađenim propustima u tijelu lukobrana dr. sc. Ivana Lovrić	154
---	-----

Ekspertni sustav podrške za izračun isplativosti izgradnje postrojenja za solarno sušenje mulja dr. sc. Emir Zekić	155
---	-----

Mehaničko-empirijski model pogoršanja geometrije uskotračnoga kolosijeka u ovisnosti o brzini tramvaja dr. sc. Igor Majstorović	156
Utjecaj ciljanih ojačanja na modele oštetljivosti tipičnih zidanih stambenih zgrada dr. sc. Ante Pilipović	157
Ponašanje mikroarmiranog morta visokih uporabnih svojstava u ranoj starosti dr. sc. Katarina Didulica	158
Utjecaj podmorskoga praga na morfodinamiku žala umjetnih plaža dr. sc. Hanna Miličević	159
Razvoj metodologije za integraciju ekoloških i ekonomskih kriterija u cilju unapređenja održivosti armiranobetonskih mostova u morskome okolišu dr. sc. Ivana Milić	160
Mogućnosti primjene pepela suncokretove ljuske kao alternativnog aktivatora za alkalnoaktivirane materijale na bazi zgre dr. sc. Olivera Bedov	161

Training AI algorithms for remote sensing monitoring of geotechnical structures using large-scale synthetic data

Lou Lerren Curacha¹, Irina Stipanović², Meho Saša Kovačević³, Mario Bačić⁴

¹Infra Plan Consulting Ltd., lou.curacha@infraplan.hr

²Infra Plan Consulting Ltd., Irina.stipanovic@infraplan.hr, University of Twente, i.stipanovic@utwente.nl

³University of Zagreb Faculty of Civil Engineering, meho.sasa.kovacevic@grad.unizg.hr

⁴University of Zagreb Faculty of Civil Engineering, mario.bacic@grad.unizg.hr

Abstract

Climate-related hazards threaten critical infrastructure, while monitoring remains limited by sparse and incomplete observations. This research proposes an AI-based workflow that integrates remote sensing data from stations, satellite, and drone through calibration, fusion, super-resolution, and forecasting to generate enhanced temporal datasets. Derived products are combined with other data to create synthetic training samples for damage detection and multi-hazard susceptibility mapping of geotechnical structures.

Key words: Remote Sensing, Machine Learning (ML), Super-Resolution, Generative Adversarial Networks (GAN), Damage Detection, Multi-Hazard Susceptibility Mapping, Structural Health Monitoring (SHM), Geotechnical Structures (GS)

Treniranje algoritama umjetne inteligencije za daljinsko praćenje stanja geotehničkih konstrukcija korištenjem velikih sintetičkih skupova podataka

Sažetak

Klimatske promjene sve više ugrožavaju kritičnu infrastrukturu, dok je praćenje njezina stanja ograničeno rijetkim i nepotpunim opažanjima. Rad istražuje primjenu umjetne inteligencije za integraciju podataka prikupljenih satelitima, dronovima i ugrađenim senzorima. Podaci će se objediniti kalibracijom, fuzijom, super-rezolucijom i prognoziranjem te koristiti za izradu sintetičkih skupova podataka za detekciju oštećenja i procjenu ranjivosti geotehničkih konstrukcija.

Gljučne riječi: daljinska istraživanja, strojno učenje, super-rezolucija, generativne suparničke mreže, detekcija oštećenja, mapiranje podložnosti višestrukim opasnostima, monitoring, geotehničke konstrukcije

1 Introduction

Critical transportation infrastructures (CTI) such as roads, railways, bridges, and other structures are increasingly exposed to landslides, rockfalls, flooding, erosion, and land subsidence due to the growing impacts of climate change on geotechnical structures (GS). Recent studies show that global warming is intensifying extreme climate events and altering precipitation patterns, while transportation assets are increasingly recognized as highly vulnerable to climate-related hazards. These hazards can cause direct physical damage to infrastructure and disrupt mobility, accessibility, emergency response, and long-term recovery. Reliable monitoring and assessment therefore require continuous information on environmental, external, and infrastructure-related variables that influence hazard occurrence, spatial susceptibility, and infrastructure condition.

Across recent studies, precipitation, temperature, slope and other digital elevation model (DEM) - derived topographic factors, land use land cover (LULC), soil properties, and other factors are repeatedly identified as important conditioning or triggering variables for landslide, flood, rockfall, and land-subsidence analysis [1-3]. However, direct observations of these variables are often spatially sparse, temporally incomplete, inconsistent in resolution, or unavailable across large areas. To address these limitations, multi-source observations from station sensors, satellite data, LiDAR, and drones can be integrated to improve spatial coverage, temporal continuity, and data completeness. Station observations can be extended through interpolation and calibration with satellite products [4-6], while satellite-derived datasets can be enhanced through data fusion, downscaling, and super-resolution using LiDAR, drone, and other high-resolution reference data [7-9]. Together, these processes can support the generation of enhanced multi-source spatio-temporal (EMST) datasets with improved spatial coverage, temporal continuity, and data completeness on performance of GS to support forecasting of environmental loading conditions and estimate temporally incomplete observations.

Building on these capabilities, the objective of this study is to develop an AI-based workflow that integrates multiple observations to generate EMST and synthetic datasets for multi-hazard susceptibility analysis, damage detection, and monitoring of geotechnical structures along transport infrastructure networks. The workflow integrates calibration, interpolation, data fusion, super-resolution, forecasting, and synthetic data generation to support AI-based identification of hazard-susceptible areas, detection of affected CTI, and interpretation of hazard-related impacts within a GIS-based digital twin platform. Through this approach, the study addresses the need for more continuous, scalable, and data-driven methods for assessing CTI exposed to multiple hazards.

2 Research methodology

The research advances the current state of the art by moving beyond hazard susceptibility, damage detection, and CTI monitoring approaches toward an AI-based workflow for the integration and fusion of remote sensing-based observations into the monitoring of GS exposed to multiple hazards. As shown in Figure 1, the proposed methodology combines ground-based observations, satellite remote sensing, LiDAR, drone data, and other geospatial datasets to address limitations related to sparse field measurements, incomplete monitoring records, and inconsistent spatial and temporal resolutions for AI model training across large transport-infrastructure networks. These multi-source observations are processed through calibration, fusion, enhancement, forecasting, and synthetic data generation to produce EMST datasets representing external and environmental variables and damage extent. The resulting datasets are then integrated into AI models for multi-hazard susceptibility mapping, damage detection, and monitoring of GS. The overall workflow consists of four main components: multi-source observations, calibration and enhancement of spatial datasets, forecasting and synthetic data generation, and AI-based analysis of hazard susceptibility and infrastructure impacts. In this way, the study supports the European Union MSCA-FOURIER project vision by contributing to AI-based data fusion and interpretation, GIS-based digital twin visualization, and risk-informed early-warning and maintenance planning for exposed CTI.

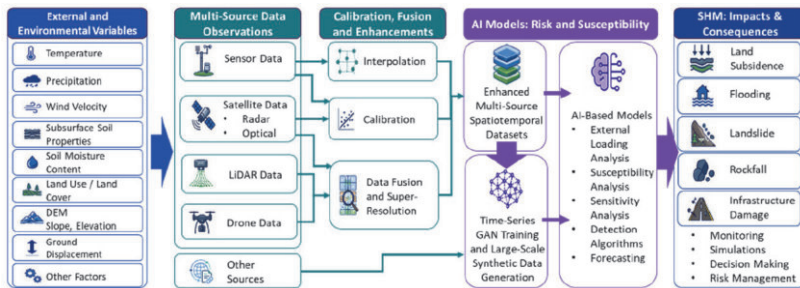


Figure 1. Scientific workflow for integrating multi-source observations for AI-based risk and susceptibility modelling

2.1 Multi-Source Observations

The methodology begins with the collection of multi-source observations representing the environmental and external variables that influence hazard occurrence, susceptibility, and infrastructure condition. These variables include precipitation, temperature, wind velocity, soil properties, LULC, topographic factors derived from DEM, and ground deformation. These variables were selected

because they are directly related to the triggering, conditioning, and evolution of hazards related to GS [1-3].

		Temporal Frequency	Spatial Resolution	Spatial Coverage	Data Sources
 Sensor Data	✓	Up to every 5 Minutes	✗ Point Coordinates	✗ Point Coordinates	DMHZ Stations FCEZG Stations
 Satellite Data • Radar • Optical	⚡	Up to Hourly (Wind) Up to Daily (Temp.) Up to Weekly (DEM) Up to Weekly (Optical)	⚡ Up to 28km (Wind) Up to 1km (Temp.) Up to 100m (DEM) Up to 10m (Optical)	✓ Global Scale	Sentinel 1 Sentinel 2 EGMS CHIRPS MODIS ERAS Landsat 7/8/9 SRTM
 LiDAR Data	✗	Upon Request	✓ 15ppsm to 40ppsm	✓ Large Scale	State LiDAR Survey
 Drone Data	✗	Upon Request	✓ Up to 20cm Resolution	✓ Large Scale	FCEZG Drone Survey

Figure 2. Overview of multi-source observations used in the study: frequency, resolution, coverage

To capture these variables, the study integrates complementary observations from station sensors, satellite data, LiDAR, and drone platforms, as summarized in Figure 2. Station sensors provide localized and temporally frequent measurements, satellite datasets extend coverage across broader areas, and LiDAR and drone data improve spatial detail for selected locations. Together, these sources provide the basis for generating EMST datasets in areas where direct observations are sparse, incomplete, or unavailable. However, temporal gaps and data-quality limitations remain common, including missing station records, cloud-affected optical imagery, low radar coherence, and limited LiDAR or drone availability due to acquisition cost and temporal constraints. These limitations support the need for calibration, fusion, enhancement, and forecasting to improve data continuity and generate more reliable inputs for regional-scale hazard susceptibility analysis.

2.2 Calibration, fusion and enhancement

The limitations identified in the collected observations require processing procedures that improve data consistency, spatial detail, and temporal continuity. Therefore, calibration, fusion, enhancement, forecasting, and interpolation are applied to transform heterogeneous datasets into more reliable, higher-resolution, and analysis-ready inputs for hazard susceptibility analysis and monitoring of GS. In particular, point-based station observations are scaled to regional coverage through interpolation and calibration with satellite-derived variables, allowing sparse local measurements to contribute to continuous regional-scale datasets. Interpolation methods such as kernel interpolation with barriers will be tested because of their reported performance [5]. Equation for Linear Regression is:

$$y_i = B_0 + B_1x_i + e_i \tag{1}$$

where:

- y_i - dependent variable (ground measurement)
- B_0 - intercept
- B_1 - regression coefficient
- x_i - independent variable (satellite observation)
- e_i - residual error

Calibration is used to improve the consistency between satellite-derived measurements and local observations. In this study, linear regression, shown in Equation (1), is considered as one calibration approach for modeling the relationship between satellite variables and ground-based measurements. Regression-based calibration has been used in previous studies to improve or assess satellite products using reference observations. One sample study includes the MODIS land surface temperature with meteorological-station data [6] another is the MODIS precipitable water vapor products with ground-based GPS observations [4].

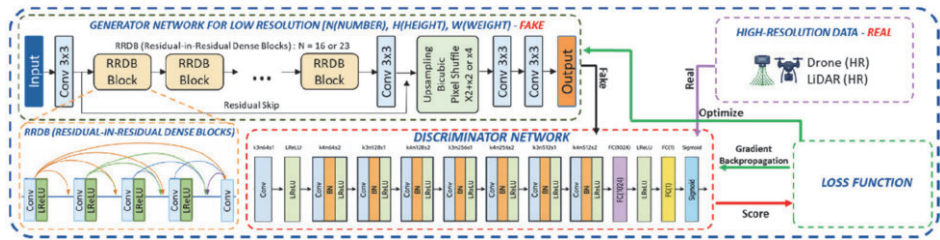


Figure 3. Proposed AI-based super-resolution framework for enhancing satellite-derived products

Satellite products are enhanced through data fusion and super-resolution such as enhanced super-resolution generative adversarial networks (ESRGAN) to improve spatial detail, terrain representation, and the delineation of surface and features. As shown in Figure 3, the pathway uses high-resolution data, such as LiDAR, drone products, or high-resolution optical imagery, to guide the enhancement of coarser satellite-derived products. When data are unavailable, an alternative is to use ESRGAN for single imagery approaches such as S2DR3 [7], although outputs should be used cautiously because performance may vary and visually enhanced textures may introduce hallucinated features [9][10]. This strategy follows UAV-satellite synergy principles, where drone observations provide high spatial detail and satellite observations provide broader spatial coverage and temporal continuity [8]. The ESRGAN framework proposed by Wang et al. (2018) [11] is considered as a reference because it can support both single-image enhancement and guided data-fusion approaches for optical and elevation data. Equation for Harmonic Regression with Linear Trend is:

$$y_t = B_0 + B_1 t + \sum_{k=1}^K \left(a_k \sin\left(\frac{2\pi k t}{P}\right) + b_k \cos\left(\frac{2\pi k t}{P}\right) \right) + e_t \quad (2)$$

where:

- y_t - dependent variable at time t
- B_0 - intercept
- k - harmonic index
- B_1 - linear trend term
- K - number of harmonics
- P - period
- a_k, b_k - sine and cosine coefficients
- e_t - residual term
- t - time

Temporal gaps in observational datasets can reduce data continuity and limit large-scale environmental monitoring and hazard analysis. To address this, forecasting methods are applied to EMST datasets to estimate missing observations and anticipate future environmental loading conditions such as temperature, precipitation, and other variables. For temperature, a harmonic regression model with a linear trend, shown in Equation (2), is proposed to capture both long-term and periodic variability using historical maximum, minimum, and mean values and the most recent seven-day observation window. Other approaches, such as long short-term memory networks may also be used for multivariate forecasting involving temperature and precipitation [12]. These forecast variables are then incorporated into the EMST for subsequent AI-based analysis of CTI exposure.

2.3 AI-based multi-hazard susceptibility mapping

The proposed workflow, shown in Figure 4, uses EMST datasets as the basis for extracting external and environmental variables for AI-based hazard analysis. These variables are derived from enhanced datasets and supplemented by geospatial, external and GS-related sources, such as DEM-based terrain factors, InSAR-derived deformation indicators, satellite-based vegetation and LULC information, and station observations, depending on the target hazard and data availability. Open geospatial databases may also provide exposure-related variables, such as traffic intensity and other infrastructure or socio-economic indicators, to represent conditioning factors, triggering factors, and exposed elements in hazard-prone areas.

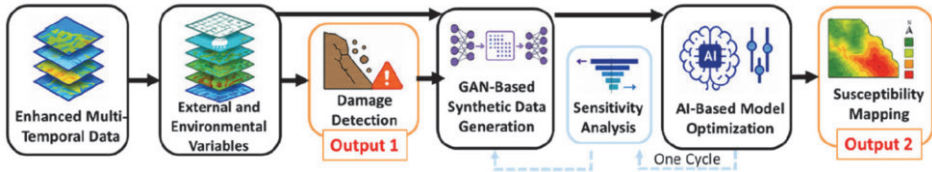


Figure 4. Proposed workflow of AI-Based Synthetic Data Generation and Multi-Hazard Susceptibility Mapping

The first output of the workflow is damage detection, which complements susceptibility mapping by identifying existing or visible impacts on CTI. Using EMST optical satellite imagery, deformation products, and other remote sensing datasets, AI-based models can be applied to detect potentially affected areas, including road damage, building damage, slope failures, and deformation-related effects. Previous studies have demonstrated the use of deep-learning, convolution neural network, InSAR-based, and vision transformer approaches for road-damage detection, building-damage assessment, and deformation-related infrastructure risk identification [13–14]. In this study, damage detection is used to provide direct evidence of observable CTI impacts and to support the interpretation of hazard-related consequences within an SHM context.

The second output is multi-hazard susceptibility mapping, where the extracted external and environmental variables are used with GAN - based synthetic data generation and AI-based model optimization. GAN-generated synthetic data are applied to produce additional training samples that support the learning process and improve model performance, which will be assessed before and after synthetic data augmentation, similar to the study by Al-Najjar and Pradhan (2020) for landslide susceptibility mapping [15]. Different AI-models or automated model-selection approaches may be evaluated under similar settings to identify suitable susceptibility models. After model optimization, a sensitivity analysis is conducted once to determine the most influential variables. These high-importance variables are then used in an additional cycle of GAN-based synthetic data generation and AI-based model optimization to refine the model and produce final multi-hazard susceptibility maps.

2.4 SHM impacts and consequences

The EMST datasets, damage-detection outputs, and multi-hazard susceptibility maps will be integrated into GIS-based digital twin platform to support life cycle management of GS exposed to climate change impacts which can cause landslides, rockfalls, flooding, erosion, land subsidence, and related hazards. Within this platform, external and environmental drivers, predicted hazard-prone areas, detected damage, and possible infrastructure consequences are linked to

infrastructure elements, allowing the workflow to move beyond hazard mapping by providing stakeholders with a monitoring environment where exposed assets can be visualized, assessed, and prioritized for inspection, validation, or intervention. The susceptibility maps and damage-detection outputs function as dynamic decision-support layers that can be updated as new datasets become available, supporting continuous monitoring, early-warning applications, and SHM monitoring. When combined with exposure datasets such as buildings, road networks, population density, or other socio-economic indicators, the platform can also support broader consequence assessment and risk-informed decision-making.

3 Conclusion

The research presented in this paper aims to develop an AI-based workflow for generating enhanced EMST and synthetic datasets for AI-driven multi-hazard susceptibility analysis, detection, simulation, and monitoring applications for GS. The proposed research addresses the challenge of sparse, incomplete, and inconsistent observational data by integrating station measurements, satellite observations, LiDAR, drone data, and other geospatial sources into more complete and analysis-ready datasets. Through calibration, fusion, enhancement, forecasting, and synthetic data generation, the workflow is designed to produce enhanced datasets that are more suitable for AI-based hazard analysis and CTI monitoring.

The main benefit of the research is its potential to support scalable and data-driven assessment of CTI exposed to multiple hazards. By applying AI models to the EMST datasets, the research can support the identification of hazard-prone areas, detection of impacts, simulation of hazard scenarios, and interpretation of results within a GIS-based digital twin platform. Overall, the proposed research provides a flexible and scalable framework for improving multi-hazard susceptibility analysis, detection, and GS monitoring using EMST and synthetic datasets.

Acknowledgment

This research is performed within FOURIER project, GA Number 101169429, which received funding from the EU HORIZON-MSCA-2023-DN-01 program.

References

- [1] Bajni, G., Camera, C. a. S., & Apuani, T. (2023). A novel dynamic rockfall susceptibility model including precipitation, temperature and snowmelt predictors: a case study in Aosta Valley (northern Italy). *Landslides*, 20(10), 2131–2154. <https://doi.org/10.1007/s10346-023-02091-x>
- [2] Dai, X., Chen, J., Zhang, T., & Xue, C. (2025). Integrated landslide risk assessment via a landslide susceptibility model based on intelligent optimization algorithms. *Remote Sensing*, 17(3), 545. <https://doi.org/10.3390/rs17030545>
- [3] Islam, T., Zeleke, E. B., Afroz, M., & Melesse, A. M. (2025). A Systematic review of urban flood susceptibility Mapping: remote sensing, machine learning, and other modeling approaches. *Remote Sensing*, 17(3), 524. <https://doi.org/10.3390/rs17030524>
- [4] Xu, J., & Liu, Z. (2022). A linear regression of differential PWV calibration model to improve the accuracy of MODIS NIR All-Weather PWV products based on Ground-Based GPS PWV data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15, 7929–7951. <https://doi.org/10.1109/jstars.2022.3204823>
- [5] Yang, R., & Xing, B. (2021). A Comparison of the Performance of Different Interpolation Methods in Replicating Rainfall Magnitudes under Different Climatic Conditions in Chongqing Province (China). *Atmosphere*, 12(10), 1318. <https://doi.org/10.3390/atmos12101318>
- [6] Zhao, B., Mao, K., Cai, Y., Shi, J., Li, Z., Qin, Z., Meng, X., Shen, X., & Guo, Z. (2020). A combined Terra and Aqua MODIS land surface temperature and meteorological station data product for China from 2003 to 2017. *Earth System Science Data*, 12(4), 2555–2577. <https://doi.org/10.5194/essd-12-2555-2020>
- [7] Akhtman, Y (2023). Sentinel-2 Deep Resolution. Available online: https://medium.com/@ya_71389/sentinel-2-deep-resolution-3-0-c71a601a2253 (accessed on 30 April 2026)
- [8] Alvarez-Vanhard, E., Corpetti, T., & Houet, T. (2021). UAV & satellite synergies for optical remote sensing applications: A literature review. *Science of Remote Sensing*, 3, 100019. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2021.100019>
- [9] Chanev, M., Kamenova, I., Dimitrov, P., & Filchev, L. (2025). Evaluation of Sentinel-2 Deep Resolution 3.0 data for winter crop identification and organic barley yield prediction. *Remote Sensing*, 17(6), 957. <https://doi.org/10.3390/rs17060957>
- [10] Massarelli, C. (2026). Super-Resolution of Sentinel-2 satellite images: A comparison of different interpolation methods for spatial knowledge extraction. *Machine Learning and Knowledge Extraction*, 8(1), 14. <https://doi.org/10.3390/make8010014>
- [11] Wang, X., Yu, K., Wu, S., Gu, J., Liu, Y., Dong, C., Loy, C. C., Qiao, Y., & Tang, X. (2018). ESRGAN: Enhanced Super-Resolution Generative Adversarial Networks. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.1809.00219>

- [12] Hasan, K., Islam, M. S., Mitu, K. N., Salam, M. I., & Aghashahi, N. (2025). Evaluating the performance of CHIRPS and CPC precipitation data for streamflow forecasting using multiple linear regression and Long Short-Term Memory Neural Network model. *MethodsX*, 15, 103443. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2025.103443>
- [13] Cha, J., Lee, S., & Kim, H. (2025). Deep Learning-Based Detection and Assessment of Road Damage Caused by Disaster with Satellite Imagery. *Applied Sciences*, 15(14), 7669. <https://doi.org/10.3390/app15147669>
- [14] Shahbazi, S., Barra, A., Gao, Q., & Crosetto, M. (2024). Detection of buildings with potential damage using differential deformation maps. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 218, 57–69. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2024.10.008>
- [15] Al-Najjar, H. A., & Pradhan, B. (2020). Spatial landslide susceptibility assessment using machine learning techniques assisted by additional data created with generative adversarial networks. *Geoscience Frontiers*, 12(2), 625–637. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.09.002>

A value of information framework for offshore wind site investigations

Leon Kučinić¹, Irina Stipanović², Ken Gavin³, Mario Bačić⁴

^{1,2}INFRA PLAN KONZALTING d.o.o., leon.kucinic@infraplan.hr, Irina.stipanovic@infraplan.hr

³ Delft University of Technology, k.g.gavin@tudelft.nl

⁴ University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, mario.bacic@grad.unizg.hr

Abstract

Geotechnical site investigations in projects of all scopes are governed more by budget constraints than actual requirements to resolve uncertainty of ground variability. This leads to under-designed or over-designed foundations. In the offshore wind context, where foundations account for 25–34% of total cost, the economic consequences of inadequate ground characterisation are significant. This paper proposes a Value of Information (VoI) framework to determine the optimal Cone Penetration Test (CPT) raster that builds on a probabilistic soil profile using Coupled Markov Chains (CMC) for stratigraphic uncertainty and Bayesian updating for strength parameter uncertainty. To turn these ground model properties into actionable insights, the probabilistic soil profile is propagated through an analytical structural response model to determine the required foundation steel volume and thus total construction costs. The optimal CPT raster is the configuration that optimises the expected reduction in project cost relative to additional investigation expenses. This paper presents a conceptual framework which will be further developed and validated on real site data during the PhD studies.

Key words: Value of Information, Site Investigation, Coupled Markov Chain, Bayesian Updating, Offshore Wind, Monopile Foundation, CPT

Model Vrijednosti Informacije za geotehničke istražne radove pučinskih vjetroelektrana

Sažetak

Geotehnički istražni radovi u projektima svih opsega prvenstveno su ograničena projektnim budžetom, a ne stvarnim zahtjevima za rješavanje nesigurnosti varijabilnosti tla. To dovodi do poddimenzioniranja ili predimenzioniranja temelja. U kontekstu pučinskih vjetroelektrana, gdje temelji čine 25–34 % ukupnih troškova, ekonomske posljedice neadekvatne karakterizacije tla su značajne. Ovaj rad predlaže okvir temeljen na vrijednosti informacija (VoI) za određivanje optimalnog rastera statičkog penetracijskog pokusa (CPT) koji koristi probabilistički profil tla pri čemu je stratigrafija modelirana uparenim Markovljevim lancima, a parametri čvrstoće Bayesovim ažuriranjem. Kako bi se svojstva ovog modela tla pretvorila u praktične rezultate, probabilistički profil tla propagira se kroz analitički model strukturnog odziva kako bi se odredio potreban volumen čelika temelja i time i ukupni troškovi gradnje. Optimalni CPT raster je konfiguracija koja optimizira očekivano smanjenje troškova u odnosu na dodatne troškove istraživanja. Ovaj rad predstavlja konceptualan model koji će se tokom doktorskog istraživanja dalje razviti i validirati sa stvarnim podacima.

Gljučne riječi: vrijednost Informacije, terenski istražni radovi, upareni Markovljevi lanci, Bayesovo ažuriranje, pučinske vjetroelektrane, monopiloti, CPT

1 Introduction

One of the largest sources of financial and technical risk in civil engineering are soil conditions. Minimal investigation cost (as low as 0.025–0.3 % of total project cost) can lead to significant cost over-runs and delays down the project [1]. Site investigations represent the primary tool to address and reduce the uncertainty in projects when it comes to soil conditions. With increase in observed data, uncertainties can be reduced through updating mean values and decreasing distribution spread which will benefit the design and construction stages of the project [2]. However, there is always a trade-off between investigation efforts and improved knowledge of design soil parameters. Nevertheless, geotechnical site investigation scope is rarely adjusted to the anticipated variability of the ground, rather it is chosen to minimise initial costs. This practice can lead to significant consequences on both ends of design spectrum: a geotechnical structure can be under-designed due to non-conservative geotechnical model, therefore risking structural failure or over-designed due to the excess of conservatism, and by that wasting materials and costs [1].

These consequences are accentuated in offshore wind projects, where foundations account for 25 to 34 % of total project cost [3]. Monopiles, large diameter tubular steel piles, are the most common type of foundation for offshore wind turbines, and their design is sensitive to soil parameters which amplifies the impact of ground model uncertainty on the project economics. This is compounded further by the transition to deeper water and more complex ground conditions which result in significant challenges beyond conventional geotechnical engineering practice [4].

A quantitative decision support framework for required additional investigation can have significant impact on the final project design quality and total project costs, while narrowing down parameters distributions. Value of Information (Vol) analysis is already a common practice across various industries such as health-care, oil & gas, economics, and is gaining popularity in civil engineering [5, 6]. Recently, Vol has been applied to geotechnical site investigation, where additional data is modelled as reducing the uncertainty and improving design outcomes [5]. Pre-posterior decision analysis quantifies the expected benefit of additional information before it is acquired.

In this paper, a framework is developed based on Vol for optimising Cone Penetration Test (CPT) raster for offshore wind turbines on monopiles which will enable rational and quantitative decision on the location and number of additional CPT sites.

2 Value of information framework

The proposed framework optimises the number and position of CPT investigations for an offshore wind farm by maximising the Vol in regard to the investigation costs. The financial metric is the expected cost of steel in the monopile foundation, which is primarily driven by the maximum bending moment induced by lateral loading, as this governs the required structural dimensions and thus the steel volume. Visualization of the framework process is shown in Figure 1. The framework begins with the existing data: regional geology mapping, geophysical investigations and any existing CPTs or boreholes. From this, an initial probabilistic soil profile is constructed at every point of the site. Stratigraphic uncertainty is modelled with Coupled Markov Chains (CMC) which are built from initial geological and geophysical data and calibrated on existing CPT and borehole investigations. Uncertainty in soil strength parameters is modelled using probabilistic distributions, where prior distributions are informed by geology, geophysics, and literature, and are updated to posterior distributions using CPT measurements and borehole data.

After that, a Monte Carlo analysis is used to propagate uncertainty of the probabilistic soil profile which turns strength parameters and stratigraphy into distribution of maximum bending moments, through the use of analytical p-y Winkler beam model.

For each of the candidate CPT locations, the expected Vol is evaluated as the predicted reduction in steel cost. Each new investigation point constrains the CMC model, while its CPT resistance values narrow the Bayesian posterior distribution of strength parameters. The benefit of new CPT extends beyond its location, narrowing the posterior distribution of surrounded area within a distance governed by scale of fluctuation.

Candidate location which maximizes cost reduction relative to investigation cost is selected. The process is repeated until the Vol of the next CPT falls below its mobilisation cost.

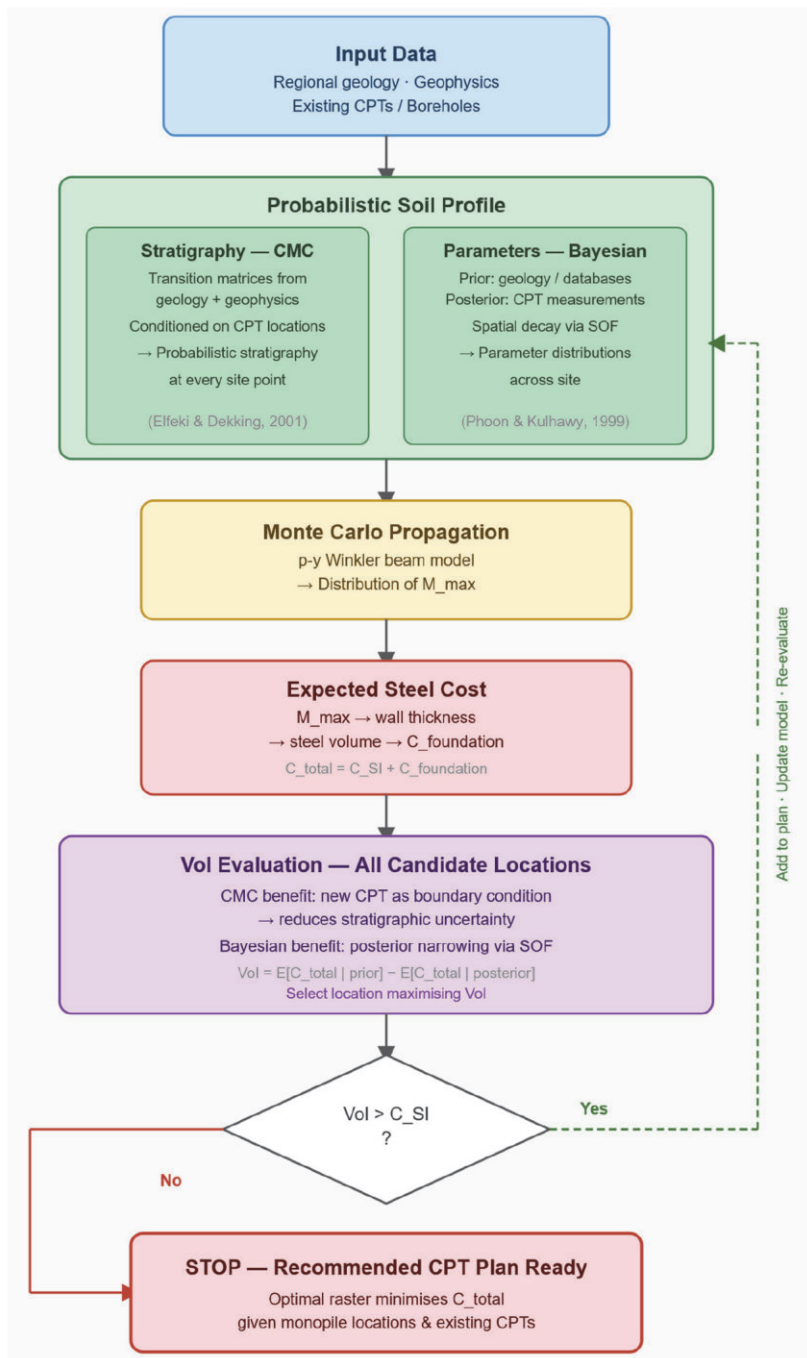


Figure 1. Vol Framework Workflow

3 Probabilistic characterisation of soil profile

Soil is a natural material formed through a long and complex geological processes that are still ongoing. Because of that, soil properties vary both in horizontal and vertical direction across almost any site [7]. Since in-situ investigation only give data in a form of a localized point, any properties between two known points are inherently uncertain. Therefore, a probabilistic soil profile is built through two sequential steps. Firstly, stratigraphic uncertainty is addressed using Coupled Markov Chains which is then followed by Bayesian updating of soil strength parameters.

3.1 Stratigraphic uncertainty: Coupled markov chains

Between two CPT locations, exact stratigraphy remains uncertain as point measurements cannot resolve what can be between them [8]. Spatial variability exists because properties and geometric features such as stratification, voids and discontinuities are spatially heterogenous [7]. Instead of assuming a deterministic stratigraphy, the CMC model can be used to assign probabilities to all possible stratigraphic configurations [9]. Markov chain is a stochastic model in which the state at any step depends only on its immediate predecessor, which makes it applicable to modelling discrete geological variables. CMC extends this into two dimensions, vertical chain to capture variation with depth, and horizontal chain to capture lateral variation coupled with a joint transition probability:

$$\Pr(Z_{i,j} = S_k \mid Z_{i-1,j} = S_l, Z_{i,j-1} = S_m) = C \Pr(X_i = S_k \mid X_{i-1} = S_l) \Pr(Y_j = S_k \mid Y_{j-1} = S_m) \quad (1)$$

Where Z_{ij} is soil state at cell (i,j) , S_k, S_l, S_m are possible geological states, X_i is the horizontal Markov Chain, Y_j is the vertical Markov Chain and C is a normalising constant ensuring the probabilities sum to one.

Transition matrices are calibrated from geological maps and geophysical survey data. CPT observations represent a fixed boundary condition at a given point, and each additional investigation point narrows down the possible solution and pushes it toward true formation [9].

3.2 Strength parameter uncertainty: Bayesian updating

Once the stratigraphy uncertainty is addressed, strength parameters still remain uncertain. This uncertainty stems from three primary sources: inherent variability due to natural geological processes, measurement error caused by equipment and operator defects and transformation uncertainty where measurements, in this case CPT values are converted into strength parameters through empirical correlation models [7].

Prior to site investigations, parameter distribution can be derived from geological maps, regional guides and published databases which will all have broad distributions and reflect the initial high uncertainty [10]. The distribution is then updated using CPT measurements. CPT provides cone resistance values with depth of the soil. These can be then transformed, through established empirical correlations, into strength parameters. Bayes' theorem then combines the prior distribution with this new measurement to produce a posterior distribution which is narrower and better constrained than the prior:

$$f(\theta | D) = \frac{L(\theta | D)f(\theta)}{\int \dots \int L(\theta | D)f(\theta) d\theta} \quad (2)$$

where $f(\theta | D)$ is the posterior probability density function of θ representing the combined knowledge, $L(\theta | D)$ is the likelihood function indicating the probability of observing data D given θ , and $f(\theta)$ is the prior probability density function representing the initial knowledge about θ before any site-specific measurements are taken.

The influence of CPT measurement on strength parameter distribution across whole site can be described as deterministic in the point of investigation, and decays spatially with distance. This correlation is characterized by scale of fluctuation [7] which defines the horizontal distance within which the soil properties show strong correlation. Beyond this distance, model falls back on the prior distribution. The function used to describe the form of decay is selected to best represent the spatial behaviour of strength parameters. Gaussian decay can be used for smoothly varying properties.

4 Structural response

To translate the probabilistic soil profile into a structural behaviour, The Beam on Nonlinear Winkler Foundation (BNWF) method, more commonly known as p-y method is used [3]. It represents one of the most widely used analytical methods for analysing laterally loaded piles. Premise is that soil reaction p at any depth is proportional to the pile-soil deflection, modelled as independent springs along the pile length. More advanced frameworks such as PISA are proposed for large diameter monopiles [11]. Key structural output used from these analyses is maximum mudline bending moment, which governs the required pile diameter and wall thickness and through that the steel mass of the foundation.

A representative set of soil profiles sampled through the use of Monte Carlo Method is propagated through the p-y model, with each of them giving a cor-

responding mudline bending moment as a result. These form the distribution of bending moment across the observed site. Addition of a new CPT simultaneously provides a new fixed boundary condition for the CMC and its stratigraphic realisations and narrows the posterior distribution of strength parameters through Bayesian updating. A further set of p-y analyses on the updated soil profile will result in reduction of the bending moment spread and therefore expected steel cost.

5 Value of information

The concept of pre-posterior decision analysis was formalised by Raiffa & Schlaifer [12] as a method to evaluate the utility of an experiment prior to its execution by computing the expectation of posterior outcomes across all possible results of an experiment. In engineering, this was adapted into a cost-minimisation framework: the optimal decision is the one that minimises total expected cost, where information collection and action decision are optimised jointly [13]. In construction industry, Bayesian decision analysis has been around since 1970s, particularly in the field of planning of operation and maintenance strategies [6]. Recently, Vol has been applied to geotechnical site investigation, where additional data is modelled as reducing the uncertainty and improving design outcomes [5].

This paper applies the same principle to the CPT raster optimisation for offshore wind monopile foundations. Total expected project cost is expressed as:

$$C_{total} = C_{SI} + C_{foundation} \quad (3)$$

Where C_{SI} is the cost of site investigations, $C_{foundation}$ is the foundation steel cost, which is determined through the distribution of soil properties. They govern the mudline bending moment in the analytical structural response model, which in turn is used to design pile wall thickness. Together with pile length and price of steel, it is used to calculate $C_{foundation}$.

Benefit of any CPT raster configuration can then be expressed as a reduction in total cost in relation to the prior state of knowledge:

$$Vol = E[C_{total}^{prior}] - E[C_{total}^{posterior}] \quad (4)$$

Decision variable that needs to be optimised is the CPT raster, number and spatial arrangement of additional sites. Candidate locations are constrained by existing CPTs and their area of influence. Planned locations of monopile foundations also provide an additional layer of economic constraint. Optimal raster is

the configuration that minimises the C_{total} . These components brought together form a planning tool that enables rational, site-specific decisions on the scope of additional geotechnical investigation.

6 Conclusion

Geotechnical site investigations are critical to both structural performance and economic feasibility of projects, especially in offshore wind farms. Still, investment decisions are made on the basis of minimal requirements and rarely based on the analysis that quantifies the value additional site investigation can bring forth. A framework that speaks both to the design geotechnical engineer and investor, translating the investigation campaign into expected reductions in material costs has significant potential. This paper presents a preliminary description of such framework with basis in Vol and probabilistic ground modelling. Current formulation remains conceptual and is intended as a starting point for further development where assumptions will be refined as framework matures. The proposed framework is also applicable in scenarios where no site-specific investigation data are available. In such cases the initial probabilistic soil profile would rely on regional geology, published databases and expert judgement, which would result in larger prior uncertainty. Consequently, expected Vol of initial CPTs would be higher, and their value would decrease as model becomes better constrained. In the next research phase data from real sites will be used for the demonstration of each individual component in order to validate the framework and propose the implementation in practice.

References

- [1] Jaksa, M.B., Goldsworthy, J.S., Fenton, G.A., Kaggwa, W.S., Griffiths, D.V., Kuo, Y.L., Poulos, H.G.: Towards reliable and effective site investigations, *Géotechnique* 55 (2005) 2, pp. 109–121.
- [2] TC205/TC304 Working Group: Bayesian Method: A Natural Tool for Processing Geotechnical Information, Joint TC205/TC304 Final Report, ISSMGE, 2017.
- [3] Bhattacharya, S.: *Design of Foundations for Offshore Wind Turbines*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2019.
- [4] Doherty, P., Gavin, K., Casey, B.: The geotechnical challenges facing the offshore wind sector, *Geo-Frontiers* 2011, ASCE, pp. 162–171. [https://doi.org/10.1061/41165\(397\)18](https://doi.org/10.1061/41165(397)18)
- [5] Hu, J.Z., Zhang, J., Huang, H.W., Zheng, J.G.: Value of information analysis of site investigation program for slope design, *Computers and Geotechnics* 131 (2021) 103938.

- [6] Zhang, W.H., Lu, D.G., Qin, J., Thöns, S., Faber, M.H.: Value of information analysis in civil and infrastructure engineering: a review, *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience* 2 (2021) 16.
- [7] Phoon, K.K., Kulhawy, F.H.: Characterization of geotechnical variability, *Canadian Geotechnical Journal* 36 (1999) 4, pp. 612–624.
- [8] Phoon, K.K., Cao, Z.J., Ji, J., Leung, Y.F., Najjar, S., Shuku, T., Tang, C., Yin, Z.Y., Ikumasa, Y., Ching, J.: Geotechnical uncertainty, modeling, and decision making, *Soils and Foundations* 62 (2022) 101189.
- [9] Elfeki, A., Dekking, M.: A Markov chain model for subsurface characterization: theory and applications, *Mathematical Geology* 33 (2001) 5, pp. 569–589.
- [10] Wang, Y., Cao, Z., Li, D.: Bayesian perspective on geotechnical variability and site characterization, *Engineering Geology* 203 (2016), pp. 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.08.017>
- [11] Byrne, B.W., Burd, H.J., Zdravković, L., McAdam, R.A., Taborda, D.M.G., Houlsby, G.T., Jardine, R.J., Martin, C.M., Potts, D.M., Gavin, K.G.: PISA: new design methods for offshore wind turbine monopiles, *Revue Française de Géotechnique* 158 (2019) 3. <https://doi.org/10.1051/geotech/2019009>
- [12] Raiffa, H., Schlaifer, R.: *Applied Statistical Decision Theory*, Harvard University Press, Boston, 1961.
- [13] Straub, D.: Value of information analysis with structural reliability methods, *Structural Safety* 49 (2014), pp. 75–85. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2013.08.006>

Fragility curves as a basis for dynamic early warning thresholds for geotechnical structures

Iva Mejašić¹, Irina Stipanović², Meho Saša Kovačević³

¹INFRA PLAN Consulting Ltd., iva.mejasic@infraplan.hr

²INFRA PLAN Consulting Ltd., irina.stipanovic@infraplan.hr

³Faculty of Civil Engineering University of Zagreb, meho.sasa.kovacevic@grad.unizg.hr

Abstract

Levees, embankments, and slopes face environmental hazards whose frequency and intensity are increasing due to climate change. Failure risk of geotechnical structures is inadequately captured by fixed threshold early warning systems. Fragility curves express failure probability as a function of hazard intensity, offering a more rigorous, updatable alternative. This paper reviews main methods for developing fragility curves and presents framework with the integrated real-time sensor network and dynamic early warning systems.

Key words: fragility curves, geotechnical structures, early warning systems, probabilistic analysis, Bayesian updating

Krivulje ranjivosti kao osnova za dinamičke pragove ranog upozoravanja za geotehničke objekte

Sažetak

Nasipi i pokosi izloženi su okolišnim hazardima čija učestalost i intenzitet rastu zbog klimatskih promjena. Rizik otkazivanja geotehničkih objekata nije adekvatno obuhvaćen sustavima ranog upozoravanja s fiksnim pragovima. Krivulje ranjivosti izražavaju vjerojatnost otkazivanja kao funkciju intenziteta hazarda, nudeći pouzdaniju i lakše ažurabilnu alternativu. Ovaj rad daje pregled glavnih metoda razvoja krivulja ranjivosti i istražuje kako se mogu kombinirati s praćenjem senzorima u stvarnom vremenu za razvoj sustava ranog upozoravanja koji reagiraju na stvarno stanje geotehničkog objekta.

Ključne riječi: krivulje ranjivosti, geotehnički objekti, sustavi ranog upozoravanja, probabilistička analiza, Bayesovo ažuriranje

1 Introduction

Due to climate change, the frequency and intensity of extreme hydro-meteorological hazards is increasing [1]. Geotechnical structures such as levees, embankments, natural and engineered slopes are exposed to such hazards and their failure during extreme weather events can cause devastating human and economic losses. Despite this, probabilistic methods for assessing their failure risk remain less developed than for other infrastructure classes [2], and Early Warning Systems (EWS) for such structures still mostly rely on fixed, empirically derived thresholds that do not incorporate uncertainty in their hazard forecasts. For example, the same observed precipitation can imply very different failure probabilities depending on antecedent saturation, material variability, and event duration, something a fixed threshold cannot capture [3].

Fragility curves provide a way to clearly account for all these dependencies, by expressing the conditional probability of reaching or exceeding a defined limit state as a function of hazard intensity [4]. When combined with real-time sensor monitoring, they provide a continuously updatable estimate of failure probability rather than a static threshold, which is a concept that drives the discussion in this paper. This paper explores the methods behind developing fragility curves for geotechnical structures and discusses their potential role in developing more physically grounded, condition-aware EWS frameworks.

2 Fragility curves – State of the art

2.1 Fragility curves concept

Fragility curves describe vulnerability by expressing the probability of reaching or exceeding a defined limit state as a function of hazard intensity [5–7]. Unlike a deterministic factor of safety, which condenses response to a single value, fragility curves capture increase of failure probability across the range of hazard intensity, portraying variability in structural properties and loading conditions [6]. The limit state can be defined as geomechanical properties such as factor of safety, internal erosion, crest settlement, or as consequences such as overtopping, breach probability or service interruption [4,6–8]. A complete fragility model is made up of a family of fragility curves, one for each relevant limit state, ranging from serviceability exceedance to structural failure, as seen in Figure 1 [4,8].

The selection of hazard intensity measure is critical and depends on the governing hazard. For example, for flood protection structure instability it could be water level or flood duration [5]. For rainfall induced instability it could be accumulated precipitation or storm intensity [6,8]. The applicability of the resulting

fragility curves relies on the ease of definition of the chosen hazard intensity measure and on how broadly the derived functions can be applied across different sites and scenarios [7].

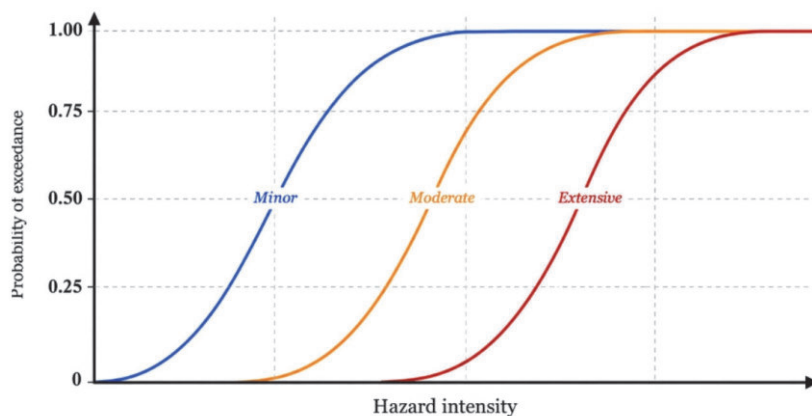


Figure 1. Schematic fragility curves for 3 limit states as a function of hazard intensity [adapted from 6]

2.2 Determination methodologies for fragility curves

Several methodological approaches are documented in the literature, broadly classified as empirical, analytical and hybrid. The empirical approach is derived from observed damage data, following past hazard events, while analytical approach utilises numerical models [2,7]. While conceptually direct, empirical approach has limited applicability for geotechnical structures, since fragility curves for them are rarely informed by field data, which would take into consideration state of the structure. Analytical approaches have therefore become the predominant method in this domain [6].

Analytical fragility curves are developed by feeding uncertain input parameters through computational models of structural response [6,7]. The most commonly used method is Monte Carlo Simulation, where uncertain input parameters are sampled from their predefined probability distributions, and stability analysis is performed for each run of the simulation. This is repeated for different levels of hazards, and the results form a fragility curve. [6] Important first step for reliable analytical models is statistical characterization of soil parameter uncertainty, which covers inherent variability, measurement error and transformation uncertainty [9]. Running large-scale simulations has also been shown to be more accurate than using specific distributional assumptions, which is demonstrated in [10], showing that common assumptions can lead to significant errors in both fragility curves and life cycle loss estimates.

Hybrid methods combine analytical model outputs with field observations through Bayesian updating, a probabilistic framework that works by starting with an initial estimate, then improving it every time new data is collected. Each updated estimate then becomes the new starting point, so the method improves as more data becomes available. Trinidad González et al., 2023 [11] applied this approach to clay railway earthwork cut slopes, demonstrating that the probability of failure can be assessed even where historical data is limited. This method is relevant for Early Warning System (EWS) application. Where sensors continuously collect real-time data, such as in active monitoring systems for infrastructure, Bayesian updating can be used to constantly improve failure probability estimates as conditions evolve.

A useful real-world example is provided in Gupta et al., 2025 [12], where EWS framework for unsaturated highway slope in Western Himalayas is developed. Piezometers and volumetric water content sensors fed a calibrated seepage model and slope stability analysis, and a machine learning algorithm trained on months of sensor data was used to predict the factor of safety from sensor readings in near-real time. Warnings were issued when the predicted factor of safety fell below defined threshold. This study demonstrated that sensor-driven stability assessment is practically achievable, and it gives a good indication of the infrastructure needed to implement a fully dynamic, fragility-based EWS in practice.

3 Fragility curves and early warning system

3.1 Current EWS Practice and its limitations

Conventional geotechnical EWS work by setting pre-defined threshold values applied to monitored parameters. When a threshold is exceeded, an alert is issued. While it is commonly used in practice [3] it has a fundamental limitation as it ignores uncertainty. In Guzzetti et al., 2020 [3], a systematic review of 26 landslide EWS found that none of them accounted for uncertainty in their hazard forecasts. Thresholds are calibrated using representative conditions and do not adapt to actual, evolving state of a structure exposed to hazard event.

Another problem is that structures gradually deteriorate over time, due to continuous exposure to loads. Briggs et al., 2023 [13] reviewed evidence for this process for clay earthwork slopes under repeated seasonal weather cycles. It shows that seasonal pore pressure cycles drive irreversible displacements. Climate change is expected to increase the magnitude of seasonal pore water pressure cycles, reducing the remaining time to failure for slopes that have already experienced substantial deterioration. A warning threshold calibrated at or near the time of construction cannot account for such cumulative, long-term degradation.

Nocentini et al., 2024 [14] optimised rainfall thresholds for an operational EWS in the Liguria region of Italy and found that standard intensity-duration thresholds produced more than double the false alarms compared to correct alarms in most alert zone. The false alarm rate was only brought down to acceptable level by adding a third factor, accounting for how much rain had fallen in the area prior to current event.

The lack of uncertainty quantification and probabilistic framing is a weakness that keeps appearing across many EWS. The underlying issue is that fixed thresholds cannot fully account for evolving multi-variable nature of geotechnical failure conditions.

3.2 Sensor-based monitoring framework for EWS

Fragility curves are a natural addition to sensor-based monitoring. Instead of a fixed threshold value, the operator is provided with a continuously computable estimate of failure probability, based on currently observed hazard intensity. Threshold levels can then be expressed as probability ranges, making the system sensitive to the actual structural state rather than a pre-calibrated number. As sensor data accumulates through multiple hazard events, it can in principle be used to update the fragility model through Bayesian updating, so that the fragility curves themselves evolve with the structure's condition. Conceptual framework is shown in Figure 2.

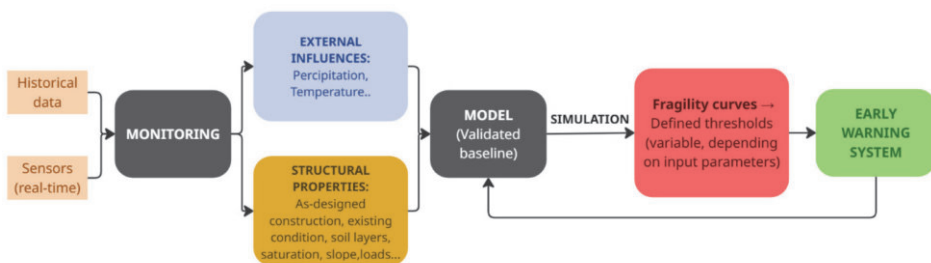


Figure 2. Conceptual framework for a sensor-informed, fragility-based dynamic EWS for geotechnical structures

Future research will apply this framework to geotechnical structures in the City of Dubrovnik, Croatia, within the context of the Horizon Europe AI-Warn project [15]. The Dubrovnik area, with its steep urbanized hilly terrain, has repeatedly experienced rainfall induced slope instabilities and retaining wall failures, making it a well justified case study location. Historical geotechnical data and a real-time sensor network which will be deployed within AI-Warn project will provide the monitoring inputs. Monte Carlo simulation combined with slope stability anal-

ysis will be used to develop families of fragility curves for extreme precipitation scenarios, parameterised by antecedent soil saturation and structural geometry. These fragility curves will form the foundation for dynamic warning thresholds integrated into the early warning system of City of Dubrovnik.

4 Conclusions

This paper has reviewed the methods behind developing fragility curves for geotechnical structures and examined their potential role in Early Warning Systems. Fragility curves are a reliable probability-based tool for expressing how vulnerable the structure is at different hazard levels. Of the three main ways to define them, Monte Carlo Simulation is the most flexible and widely applied. Hybrid approaches combine analytical models with real world data through Bayesian updating offer further improvements as monitoring data accumulates.

Conventional EWS rely on fixed threshold that don't incorporate uncertainty. This is problematic because of the gradual long term structural deterioration after exposure to hazards.

Fragility curves offer a natural probabilistic complement to sensor-based monitoring. They provide a continuously computable estimate of failure probability that can be updated via Bayesian inference as sensor data accumulates, with the threshold values adapting to the evolving state of the structure. Combining fragility curves with real time sensor data in geotechnical EWS is still actively developing area. The three key components – probabilistic stability analysis, sensor-based monitoring and data assimilation have each been developed and used in their own fields. However, bringing them all together into a coherent operational framework for geotechnical infrastructure needs to be further explored. The ongoing research will address this gap through a Dubrovnik case study, developing fragility curve families for rainfall-induced slope instabilities using sensor monitoring data from the Horizon Europe AI-Warn project and implementing them as adaptive warning thresholds.

Acknowledgment

This research is performed within AI-Warn project, GA Number 101254083, which received funding from the EU UCPM-2025-KAPP-PVPP program.

References

- [1] IPCC: Summary for Policymakers, in: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, 2022.
- [2] Nirandjan, S., Koks, E. E., Ye, M., Pant, R., Van Ginkel, K. C. H., Aerts, J. C. J. H., Ward, P.: Physical Vulnerability Database for Critical Infrastructure Hazard Risk Assessments — A Systematic Review and Data Collection, *Natural Hazards and Earth System Sciences* 24 (2024), 4341–4388.
- [3] Guzzetti, F., Gariano, S. L., Peruccacci, S., Brunetti, M. T., Marchesini, I., Rossi, M., Melillo, M.: Geographical landslide early warning systems, *Earth-Science Reviews* 200 (2020), 102973.
- [4] Kennedy, R. P., Cornell, C. A., Campbell, R. D., Kaplan, S., Perla, H. F.: Probabilistic Seismic Safety Study of an Existing Nuclear Power Plant, *Nuclear Engineering and Design* 59 (1980) 2, 315–338.
- [5] Rossi, N., Bačić, M., Kovačević, M. S., Librić, L.: Development of Fragility Curves for Piping and Slope Stability of River Levees, *Water* 13 (2021) 5, 738.
- [6] Kurter, E. C., Khan, M. S., Micheli, L., Downey, A. R. J., Imran, J.: Fragility Curves for Highway Embankment Slope Stability under Extreme Rainfall, *Natural Hazards Review* 26 (2025) 4, 04025052.
- [7] McKenna, G., Argyroudis, S., Winter, M. G., Mitoulis, S.: Multiple Hazard Fragility Analysis for Granular Highway Embankments: Moisture Ingress and Scour, *Transportation Geotechnics* 26 (2021), 100431.
- [8] Zhou, H., Ma, F., Yu, X., Zheng, G.: Fragility Assessment for the Rainfall-Induced Embankments on Silty Soils, *Frontiers in Built Environment* 10 (2024), 1389576.
- [9] Phoon, K.-K., Kulhawy, F. H.: Characterization of Geotechnical Variability, *Canadian Geotechnical Journal* 36 (1999) 4, 612–624.
- [10] Karamlou, A., Bocchini, P.: Computation of Bridge Seismic Fragility by Large-Scale Simulation for Probabilistic Resilience Analysis, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 44 (2015) 13, 1959–1978.
- [11] Trinidad González, Y., Briggs, K. M., Svalova, A., Glendinning, S.: Evaluating the Likelihood of Slope Failure in Ageing Earthworks Using Bayesian Updating, *Infrastructure Asset Management* 10 (2023) 4, 207–222.
- [12] Gupta, K., Satyam, N.: Integrating Real-Time Sensor Data for Improved Hydrogeotechnical Modelling in Landslide Early Warning in Western Himalaya, *Engineering Geology* 338 (2024), 107630.

- [13] Briggs, K. M., Helm, P. R., Smethurst, J. A., Smith, A., Stirling, R., Svalova, A., Trinidad González, Y., Loveridge, F. A., Glendinning, S.: Evidence for the Weather-Driven Deterioration of Ageing Transportation Earthworks in the UK, *Transportation Geotechnics* 43 (2023), 101130.
- [14] Nocentini, N., Medici, C., Barbadori, F., Gatto, A., Franceschini, R., del Soldato, M., Rosi, A., Segoni, S.: Optimization of Rainfall Thresholds for Landslide Early Warning Through False Alarm Reduction and a Multi-Source Validation, *Landslides* 21 (2024), 557–571.
- [15] <https://civil-protection-knowledge-network.europa.eu/projects/ai-warn>

Decision making framework through digital twin for lifecycle management of tunnel in Karst

Mohammadhamed Mozafarian¹, Irina Stipanović², Kenneth Gavin³, Mario Bačić⁴, Meho Saša Kovačević⁵

¹Infra Plan konzalting d.o.o., hamed.mozafarian@infraplan.hr

²Infra Plan konzalting d.o.o. Irina.stipanovic@infraplan.hr, University of Twente, i.stipanovic@utwente.nl

³Delft University of Technology, K.G.Gavin@tudelft.nl

⁴University of Zagreb, mario.bacic@grad.unizg.hr

⁵University of Zagreb, meho.sasa.kovacevic@grad.unizg.hr

Abstract

Aging karst tunnels face escalating risks from environmental and structural degradation. Through a systematic review of the state-of-the-art literature, this study proposes a conceptual methodology that leverages Digital Twin capabilities through the integration of physics-based and data-driven approaches for the monitoring and maintenance of karst tunnels throughout their lifecycle. The proposed framework aims to enhance predictive maintenance, improve resilience assessment, optimize stakeholder decision-making, and support sustainable lifecycle asset management.

Key words: digital twin, decision optimization, structural health monitoring, Karst tunnel, lifecycle management

Okvir za donošenje odluka primjenom digitalnog bližanca za upravljanje životnim ciklusom tunela u kršu

Sažetak

Postojeći tuneli u kršu suočavaju se sa sve većim rizicima uslijed okolišne i strukturne degradacije. Kroz sustavni pregled literature, ova studija predlaže konceptualnu metodologiju koja koristi mogućnosti digitalnih blizanaca (Digital Twin) putem integracije fizikalno utemeljenih i podatkovno vođenih pristupa za praćenje stanja i održavanje krških tunela tijekom njihovog životnog vijeka. Predloženi okvir ima za cilj unaprijediti prediktivno održavanje, poboljšati procjenu otpornosti, optimizirati donošenje odluka dionika te podržati održivo upravljanje imovinom tijekom cijelog životnog ciklusa.

Ključne riječi: digitalni blizanac, optimizacija odluka, praćenje stanja konstrukcije, Krški tunel, upravljanje životnim ciklusom

1 Introduction

Modern society relies heavily on road and rail networks for the seamless movement of goods and people. Within these networks, underground infrastructure serves as critical nodes, particularly in mountainous regions, where they are indispensable for connectivity. However, these assets are under escalating pressure from the combined effects of structural aging, climate change, and intensified operational demands [1]. While aging necessitates more frequent interventions, extreme weather and natural disasters introduce heightened systemic risks. Effective maintenance and periodic monitoring, comprising both physical repairs and strategic management, is therefore essential to preserve asset functionality. Neglecting these maintenance requirements risks not only functional degradation and economic inefficiency but also catastrophic loss of life. Such consequences were illustrated by the 2012 Sasago Tunnel collapse in Japan and the 2006 Fort Point Channel Tunnel collapse in the United States, which resulted not only in prolonged transportation disruptions and costly repair operations, but also in nine and one fatalities, respectively, due to inadequate monitoring and delayed maintenance interventions [2, 3].

Among underground infrastructure systems, tunnels represent particularly complex and critical assets due to their structural, environmental, and operational characteristics. Consequently, their effective monitoring and maintenance increasingly rely on the adoption of advanced and emerging technologies. However, the inherent heterogeneity, sparsity, and multi-source nature of monitoring data present significant challenges for interpretation and utilization. This highlights the need for a comprehensive decision-making framework capable of integrating diverse data streams and fully leveraging modern technological capabilities. In this study, existing state-of-the-art approaches for monitoring and digital twin-based frameworks for life cycle management of tunnels are reviewed, and a methodological framework is proposed to support decision making for tunnel infrastructure. Figure 1 investigates the recent key technologies for infrastructure asset management through their lifecycle.

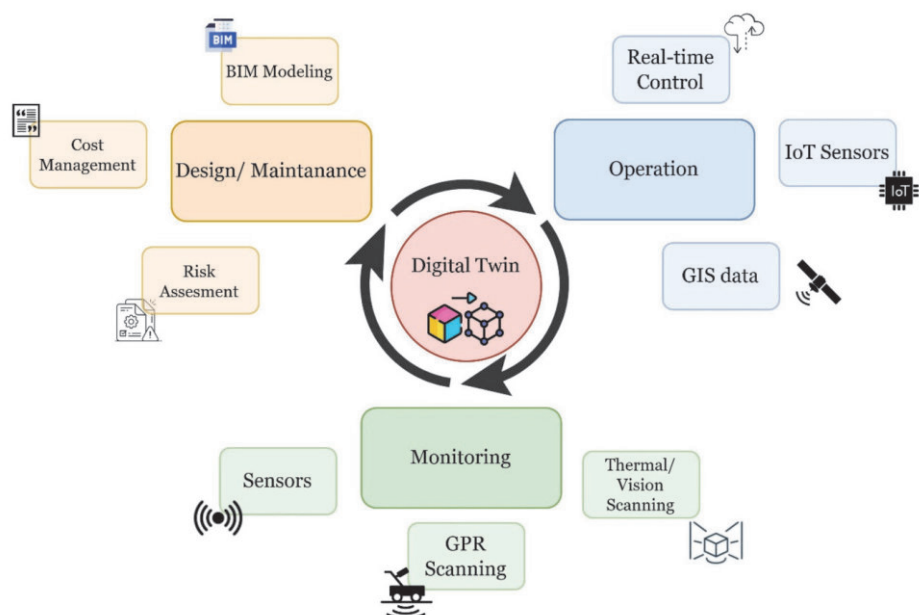


Figure 1. Digital Twin of infrastructure-level from circular view with key technologies identified

2 State-of-the-art

In recent years, the Architecture, Engineering, and Construction (AEC) industry has undergone a significant digital transformation, aligned with the European Commission's vision of Industry 5.0, which emphasizes sustainability, resilience, and human-centric development throughout the infrastructure lifecycle [4, 5]. This transformation is characterized by the integration of sensing technologies, advanced data analytics, and digital modeling, which are reshaping monitoring and maintenance strategies across the infrastructure sector, including underground assets [6].

Tunnel infrastructure, in particular, has experienced increasing adoption of innovative monitoring approaches aimed at capturing continuous deformation behavior over the asset lifecycle and enabling more proactive assessment of structural health. Broadly, these approaches can be categorized into two main groups: continuous deformation monitoring and visual inspection techniques [7]. Continuous deformation monitoring can be further divided into local and distributed methods. Local monitoring typically involves instruments such as linear variable differential transformers (LVDTs), micrometer measurement, and strain gauges [8], whereas distributed monitoring relies on technologies such as distributed optical fiber sensors (DOFS) and fiber Bragg grating (FBG) sensors [9, 10]. In ad-

dition, tilt sensors and automated surveying techniques, including periodic laser scanning, are increasingly utilized [11]. The second category, visual inspection methods concerning surface defect detection, commonly employs thermal imaging [12] and high-resolution imaging techniques [13, 14]. Furthermore, ground-penetrating radar (GPR) has shown strong potential for subsurface inspection and is increasingly being adopted in tunnel monitoring applications [15, 16]. Integrating heterogeneous monitoring data to support asset management remains a significant challenge for stakeholders and decision-makers. In this context, Digital Twin (DT) approaches are increasingly adopted in tunnel asset management to address data fusion and integration needs, enabling more informed and optimized decision-making processes. Recent research has advanced the development of predictive and prescriptive DT platforms that leverage monitoring data and analytical tools to anticipate future asset conditions and support maintenance planning [17]. A predictive DT focuses on forecasting future states by integrating statistical, physics-based, and knowledge-driven models. Its performance is continuously refined through real-time data feedback, with the primary objective of predicting infrastructure behavior and identifying potential failure scenarios [18, 19]. Extending this concept, a prescriptive DT extends these capabilities by addressing decision-making processes, providing actionable recommendations on appropriate interventions. By combining predictive insights with optimization techniques, it supports real-time decision-making and facilitates the effective management of construction and operational processes. Through the use of monitoring data and advanced analytics, prescriptive twins enable targeted intervention strategies triggered by predefined thresholds or performance indicators [20, 21, 22]. However, important limitations persist, particularly in achieving comprehensive lifecycle coverage for tunnel systems [23]. Accordingly, there is a growing need for a holistic DT-based decision-making framework that supports tunnel assets throughout their entire lifecycle. Such a framework would enable stakeholders to make informed decisions based on the integration and combined interpretation of diverse monitoring technologies.

3 Digital twin framework for Karst tunnel lifecycle management

3.1 Challenges and Outlook

Underground infrastructure, especially karst tunnels, is highly vulnerable to a wide range of natural and anthropogenic hazards, with deterioration driven by both internal and external mechanisms. Internal factors, including design deficiencies, substandard materials, and poor construction practices, can significantly reduce structural capacity and increase susceptibility to premature failure.

External influences, such as geotechnical conditions, groundwater, and heavy traffic loading, impose additional stress on tunnel systems, often interacting to accelerate degradation processes. For instance, concrete spalling may result from the combined effects of inadequate construction, reinforcement corrosion, thermal variations, and mechanical impacts [24]. Geological and groundwater conditions are particularly critical, as the surrounding ground governs structural deformation, cracking, and corrosion behavior. Groundwater further worsens deterioration through mechanisms such as erosion and freeze–thaw cycles, posing persistent risks during both construction and operation. In karst tunnels, these challenges are further intensified by significant long-term structural deformation throughout the asset lifecycle, which may ultimately lead to cavity collapse [8, 25]. Addressing these interacting factors is essential to enhance the resiliency, safety, and long-term performance of infrastructure.

As discussed in Section 2, existing implementations of Digital Twin (DT) technologies primarily focus on individual lifecycle stages and periodic maintenance activities. While these approaches have significantly advanced tunnel asset management within specific phases, comprehensive analyses encompassing the entire lifecycle remain limited. This gap underscores the need for a holistic DT framework capable of integrating and extending data and models across all lifecycle stages to fully realize the potential of this technology. Such an approach calls for more proactive and adaptive infrastructure management strategies, where the DT paradigm enables continuous digital interaction through interconnected functional modules, including sensing, data fusion, learning, prediction, and actuation. This evolution represents a shift from static and fragmented management practices toward more agile, intelligent, and data-driven infrastructure systems. Moving forward, the integration of heterogeneous data sources is fundamental to the effective implementation of DT models. Data serves as the core component for predicting deterioration processes and enabling adaptive maintenance strategies. However, a major challenge lies in the limited availability of datasets with sufficient volume and diversity, as well as in the efficient transformation of raw data into actionable information and knowledge for decision support. In this context, the integration of hybrid physics-informed and data-driven approaches, such as Physics-Informed Neural Networks (PINNs) [26] combined with deep learning (DL) models, with real-time and periodic monitoring data offers significant potential to overcome data scarcity, improve model generalization, and enhance interoperability within DT systems. Nevertheless, this area still requires further development to achieve robust and scalable DT implementations. Advancements in this area will enhance decision-making processes by enabling the systematic incorporation of uncertainty and reliability considerations throughout the entire lifecycle of tunnel assets.

3.2 Methodology overview

This study proposes a conceptual DT-based framework for tunnel risk assessment through its lifecycle, structured around the integration of multi-source data, hybrid modeling approaches, and decision support mechanisms. An overview of the proposed framework is shown in Figure 2. At its core, the framework combines real-time monitoring data with a Building Information Modeling (BIM) environment to establish a dynamic and continuously updated digital representation of the tunnel asset. Data fusion processes enable the integration of heterogeneous inputs, including sensor measurements and synthetic data generated from numerical simulations, to address data sparsity and enhance model robustness. These enriched datasets are then utilized within a centralized analytical layer, where various neural network approaches are employed to extract patterns, estimate structural states, and predict degradation trends. The framework is designed to support bidirectional information flow, ensuring continuous feedback between physical assets and their digital counterparts.

Within the analytical layer, the methodology envisions the integration of advanced physics-based and machine learning techniques, including proposing PINN and DL architectures for long-term deformation prediction in karst tunnels with data derived from various sources discussed in Section 2. These approaches enable the simultaneous incorporation of physical laws and data-driven insights, improving predictive reliability under limited or uncertain data conditions. The outputs of these models feed into higher-level modules for risk analysis and asset management, where condition assessments are translated into actionable indicators for operation and maintenance (O&M) decision-making. The framework is intentionally designed at a conceptual level to allow flexibility for future development, including the refinement of model architectures, expansion of data sources, and incorporation of uncertainty quantification. Ultimately, it provides a scalable structure for evolving toward a fully integrated, predictive, and prescriptive DT system for tunnel infrastructure.

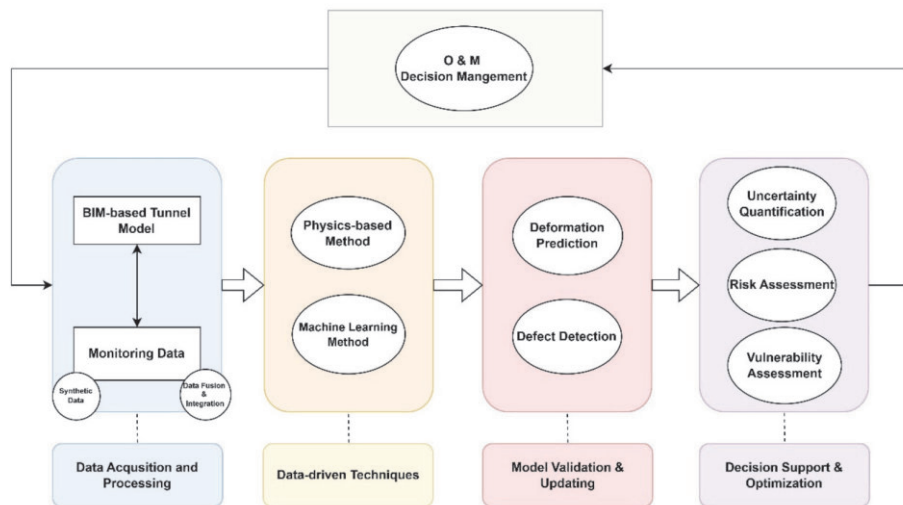


Figure 2. A conceptual digital twin-based framework for tunnel lifecycle assessment, integrating multi-source monitoring data, BIM-based digital representation, hybrid physics-informed and data-driven modeling, and risk-informed decision-making for operation and maintenance.

4 Conclusion

This paper has highlighted the growing challenges associated with the management of tunnel infrastructure, driven by aging systems, increasing internal and external stressors, and the complexity of monitoring and maintenance processes. While recent advances in sensing technologies and Digital Twin (DT) applications have significantly improved condition assessment at individual lifecycle stages, a comprehensive and integrated approach spanning the entire lifecycle remains limited. This gap underscores the need for a unified framework capable of systematically combining heterogeneous data sources, advanced modeling techniques, and decision-support tools.

In response, this paper has proposed a conceptual digital twin-based framework that integrates real-time monitoring, digital modeling, data fusion, and intelligent analytics within a unified structure for tunnel lifecycle management. By incorporating both physics-informed and data-driven approaches, the framework demonstrates the potential to enhance predictive capabilities and support more informed, risk-based decision-making. Although the proposed methodology remains at a conceptual stage, it establishes a foundation for future research aimed at developing fully operational DT systems. Further work will focus on the implementation and validation of the framework through case studies, refine-

ment of analytical models, and the incorporation of uncertainty quantification to improve reliability and robustness. Ultimately, this approach contributes toward the transition to more proactive, adaptive, and resilient infrastructure management systems.

Acknowledgment

This research is performed within FOURIER project, GA Number 101169429, which received funding from the EU HORIZON-MSCA-2023-DN-01 program.

References

- [1] ASCE, "The American Society of Civil Engineers' Report Card on America's Infrastructure," in *Women in Infrastructure*, L. P. and T. J. S. Lehman Maria, Ed., Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 5–21. doi: 10.1007/978-3-030-92821-6_2.
- [2] H. Yu, J. Chen, A. Bobet, and Y. Yuan, "Damage observation and assessment of the Longxi tunnel during the Wenchuan earthquake," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 54, pp. 102–116, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.02.008>.
- [3] Y. Fujino and D. M. Siringoringo, "Recent research and development programs for infrastructures maintenance, renovation and management in Japan," *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 16, no. 1, pp. 3–25, 2020, doi: 10.1080/15732479.2019.1650077.
- [4] M. Breque, L. De Nul, and A. Petridis, "Industry 5.0: towards a sustainable, human-centric and resilient European industry," 2021.
- [5] J. Müller, "Enabling technologies for Industry 5.0," European Commission, pp. 8–10, 2020.
- [6] Y.-J. Cha, R. Ali, J. Lewis, and O. Büyük ztürk, "Deep learning-based structural health monitoring," *Autom. Constr.*, vol. 161, p. 105328, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105328>.
- [7] I. W. Pierce, W. Broere, R. A. de Jong, and H. Mortier, "The future of immersed tunnel monitoring & inspection: Exploration into monitoring methods," in *Tunnelling into a Sustainable Future: Methods and Technologies*, J. Johansson and others, Eds., London: CRC Press / Taylor & Francis, 2025. doi: 10.1201/9781003559047-518.
- [8] M. S. Kovačević, M. Bačić, K. Gavin, and I. Stipanović, "Assessment of long-term deformation of a tunnel in soft rock by utilizing particle swarm optimized neural network," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 110, p. 103838, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103838>.

- [9] X. Zhang and W. Broere, "Monitoring seasonal deformation behavior of an immersed tunnel with distributed optical fiber sensors," *Measurement*, vol. 219, p. 113268, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113268>.
- [10] C. Ren, X. Sun, M. He, and Z. Tao, "Application of FBG Sensing Technology for Real-Time Monitoring in High-Stress Tunnel Environments," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 18, 2024, doi: [10.3390/app14188202](https://doi.org/10.3390/app14188202).
- [11] H. Sun, Z. Xu, L. Yao, R. Zhong, L. Du, and H. Wu, "Tunnel Monitoring and Measuring System Using Mobile Laser Scanning: Design and Deployment," *Remote Sens. (Basel)*, vol. 12, no. 4, 2020, doi: [10.3390/rs12040730](https://doi.org/10.3390/rs12040730).
- [12] H. Seo, "Infrared thermography for detecting cracks in pillar models with different reinforcing systems," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 116, p. 104118, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104118>.
- [13] Z. Ye, M. Mozafarian, P. A. R. Cavallaro, K. Altinay, V. Villa, and J. Ninić, "Automated multi-category tunnel damage detection and report generation from ultra-high-resolution panoramic laser images," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 168, p. 107194, 2026, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2025.107194>.
- [14] M. H. Mozafarian, G. Desiderio, Z. Ye, J. Ninic, and V. Villa, "Image-based multi-damage detection in tunnels: a deep learning dataset for structural health monitoring," in *EC3 Conference 2025*, 2025, p. 0.
- [15] H. Zhu, M. Huang, and Q.-B. Zhang, "TunGPR: Enhancing data-driven maintenance for tunnel linings through synthetic datasets, deep learning and BIM," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 145, p. 105568, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105568>.
- [16] M. M. Rosso, G. Marasco, S. Aiello, A. Aloisio, B. Chiaia, and G. C. Marano, "Convolutional networks and transformers for intelligent road tunnel investigations," *Comput. Struct.*, vol. 275, p. 106918, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2022.106918>.
- [17] H. Zhu, M. Huang, P. Ji, F. Xiao, and Q.-B. Zhang, "Transforming the maintenance of underground infrastructure through Digital Twins: State of the art and outlook," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 161, p. 106508, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2025.106508>.
- [18] L. B. Machado and M. M. Futai, "Tunnel performance prediction through degradation inspection and digital twin construction," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 144, p. 105544, 2024.
- [19] C. Zhou, W. Qin, H. Luo, Q. Yu, B. Fan, and Q. Zheng, "Digital twin for smart metro service platform: Evaluating long-term tunnel structural performance," *Autom. Constr.*, vol. 167, p. 105713, 2024.

- [20] H. Salzgeber, M. Ernst, L. Schneiderbauer, and M. Flora, "From digital model to digital twin in tunnel construction," *Civil Engineering Design*, vol. 6, no. 3, pp. 74–83, 2024.
- [21] Q. Ai, Y. Yuan, S.-L. Shen, H. Wang, and X. Huang, "Investigation on inspection scheduling for the maintenance of tunnel with different degradation modes," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 106, p. 103589, 2020.
- [22] M. S. Kovačević, M. Bačić, M. Vukomanović, and A. Cerić, "A framework for automatic calculation of life-cycle remediation costs of secondary lining cracks," *Autom. Constr.*, vol. 129, p. 103714, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103714>.
- [23] N. Babanagar, B. Sheil, J. Ninić, Q. Zhang, and S. Hardy, "Digital twins for urban underground space," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 155, p. 106140, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.106140>.
- [24] FHWA, "Tunnel Operations, Maintenance, Inspection, and Evaluation (TOMIE) Manual," Washington, DC, Jul. 2015. [Online]. Available: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/42887>
- [25] S. Wang, Z. Ding, K. Yang, J. Yang, W. Ding, and Y. Guo, "A multi-scale analysis of karst tunnel collapse induced ground subsidence based on continuous-discrete coupling method," *Results in Engineering*, vol. 29, p. 108628, 2026, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108628>.
- [26] M. Raissi, P. Perdikaris, and G. E. Karniadakis, "Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations," *J. Comput. Phys.*, vol. 378, pp. 686–707, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.10.045>.

RoboRAIL: istraživački okvir za razvoj robotskog IoT sustava za nadzor stanja željezničke infrastrukture

**Luka Pušić¹, Danijela Jurić Kačunić², Mario Bačić³, Lovorka Librić⁴,
Meho Saša Kovačević⁵**

¹Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, luka.pusic@grad.unizg.hr

²Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, danijela.juric.kacunic@grad.unizg.hr

³Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, mario.bacic@grad.unizg.hr

⁴Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, lovorka.libric@grad.unizg.hr

⁵Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, meho.sasa.kovacevic@grad.unizg.hr

Sažetak

U radu se prikazuje RoboRAIL kao istraživački okvir za razvoj robotskog IoT sustava za nadzor stanja željezničke infrastrukture. Polazi se od potrebe za češćim i objektivnijim pregledom gornjeg i donjeg ustroja pruge u uvjetima povećanih prometnih opterećenja i klimatski uvjetovane degradacije. Naglasak je na integraciji višesenzorskih podataka, bežičnom prijenosu i primjeni umjetne inteligencije za detekciju anomalija, ranu dijagnostiku i potporu prediktivnom održavanju kritične infrastrukture.

Ključne riječi: RoboRAIL, robotski IoT sustav, višesenzorski nadzor, umjetna inteligencija

RoboRAIL: A research framework for developing a Robotic IoT system for railway infrastructure condition monitoring

Abstract

This paper presents RoboRAIL as a research framework for developing a robotic IoT system for railway infrastructure condition monitoring. The starting point is the need for more frequent and objective inspection of railway superstructure and substructure under increasing traffic loads and climate-induced degradation. The focus is on integrating multi-sensor data, wireless data transfer and artificial intelligence for anomaly detection, early diagnostics and support to predictive maintenance of critical infrastructure.

Key words: RoboRAIL, robotic IoT system, multi-sensor monitoring, artificial intelligence

1 Uvod

Željeznička infrastruktura pripada skupini kritične prometne infrastrukture čija se sigurnost i pouzdanost moraju održavati tijekom cijelog uporabnog vijeka. Stanje pruge ovisi o međudjelovanju elemenata gornjeg ustroja, kao što su tračnice, pragovi i zastor, te donjeg ustroja, odnosno podzastornog sloja, nasipa i temeljnog tla. Promjene u bilo kojem od tih dijelova mogu utjecati na geometriju kolosijeka, sigurnost prometa i troškove održavanja.

Potreba za učestalijim i podatkovno utemeljenim pregledima dodatno je naglašena zbog porasta prometnih opterećenja i utjecaja klimatskih promjena. Ekstremne temperature, intenzivne oborine, smrzavanje i promjene vlažnosti mogu ubrzati degradaciju zastora, podloge i nasipa, pri čemu se dio nepovoljnih procesa razvija postupno i nije uvijek vidljiv tijekom redovitih vizualnih pregleda [1].

Postojeći pristupi uključuju vizualne preglede, ručna mjerenja, specijalizirane mjerne vlakove te različite mobilne ili lokalne mjerne sustave. Iako daju vrijedne podatke, često su ograničeni cijenom, dostupnošću, složenom logistikom ili nedovoljnom učestalošću pregleda. Mobilni sustavi za pregled geometrije kolosijeka predstavljaju važan iskorak prema učinkovitijem prikupljanju podataka [2], dok su metode za procjenu stanja željezničkih nasipa pokazale da se odluke o održavanju mogu kvalitetnije donositi kada se različiti pokazatelji stanja povežu u jedinstveni okvir [3].

Usporedno s razvojem senzora, robotike i računalne obrade podataka razvijaju se i robotski sustavi za inspekciju željezničke infrastrukture. Dosadašnja istraživanja pokazuju da postojeća robotska rješenja najčešće pokrivaju pojedine zadatke, primjerice pregled tračnica, geometrije kolosijeka ili kontaktne mreže, dok je integrirani nadzor gornjeg i donjeg ustroja još uvijek otvoren istraživački problem [4]. Poseban izazov predstavlja povezivanje površinskih i podzemnih pokazatelja stanja pruge te pretvaranje velikih količina senzorskih podataka u informacije korisne za odlučivanje o održavanju.

U tom se kontekstu RoboRAIL promatra kao istraživački okvir za razvoj robotskog IoT sustava za nadzor stanja željezničke infrastrukture. Za potrebe doktorskog istraživanja posebno je važan geotehnički aspekt problema, odnosno razvoj metodologije kojom se podaci prikupljeni s robotske platforme mogu koristiti za bolje razumijevanje stanja zastora, podzastornog sloja, nasipa i podloge. Projekt RoboRAIL koordinira Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, a partneri na projektu su ALTPRO, renomirana hrvatska tvrtka i jedan od vodećih regionalnih proizvođača sigurnosnih i signalno-sigurnosnih sustava za željezničku infrastrukturu, te Akademija tehničkih znanosti Hrvatske (HATZ), institucija koja okuplja vodeće stručnjake i znanstvenike te pruža izvrsnu platformu za povezivanje znanosti, gospodarstva i tehnološkog razvoja.

2 Istraživački problem i doktorski istraživački okvir

Iako se u praksi razvijaju sve napredniji sustavi za pregled željezničke infrastrukture, velik dio postojećih rješenja i dalje je usmjeren na pojedine elemente sustava. Najčešće se zasebno promatraju geometrija kolosijeka, stanje tračnica, stanje pragova, stanje zastora ili pojedini geotehnički pokazatelji donjeg ustroja. Takav pristup omogućuje detaljnu analizu pojedinih komponenti, ali ne daje uvijek cjelovitu sliku ponašanja pruge kao složenog sustava. S geotehničkog stajališta posebno je važno pitanje kako iz podataka prikupljenih s površine pruge prepoznati promjene koje se razvijaju u donjem ustroju. Degradacija zastora, povećanje vlažnosti, slabljenje podloge, lokalna slijeganja ili promjene krutosti mogu postupno utjecati na geometriju kolosijeka i dugoročnu uporabljivost pruge, iako nisu odmah vidljivi tijekom standardnog pregleda.

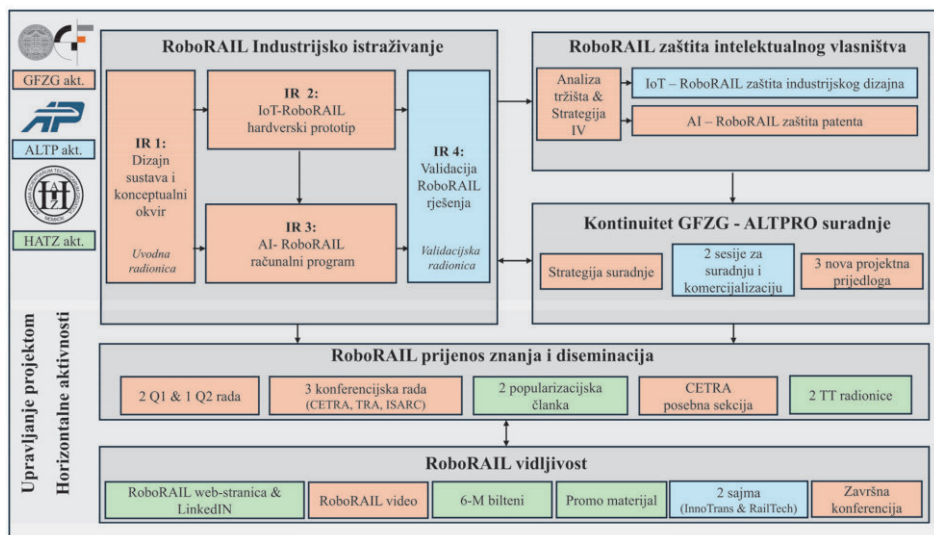
Doktorski istraživački prostor unutar projekta RoboRAIL nalazi se u razvoju metodologije za integraciju heterogenih višesenzorskih podataka prikupljenih robotskom platformom. Pritom se očekuje povezivanje podataka različite prirode: prostornih podataka dobivenih LiDAR SLAM tehnologijom, geofizičkih podataka dobivenih višekanalnim georadarom, položajnih podataka, podataka o kretanju platforme te dodatnih okolišnih i senzorskih mjerenja.

Poseban izazov proizlazi iz činjenice da ti podaci nemaju istu prostornu rezoluciju, dubinu zahvata, točnost ni osjetljivost na pojedine tipove oštećenja. LiDAR i vizualno-prostorni podaci prikazuju površinsko stanje i geometriju, dok georadar daje informacije o unutarnjoj strukturi zastora i podloge. Zbog toga znanstveni izazov nije samo u prikupljanju podataka, nego u njihovoj zajedničkoj interpretaciji.

3 Koncept RoboRAIL sustava

RoboRAIL se sastoji od dvije osnovne cjeline. Prva je IoT-RoboRAIL, odnosno hardverska robotska platforma opremljena senzorskim, komunikacijskim i energetske modulima. Druga je AI-RoboRAIL, softverska platforma namijenjena obradi, integraciji i interpretaciji prikupljenih podataka. Hardverski dio sustava prikuplja podatke na pruzi, dok softverski dio omogućuje njihovu analizu, izdvajanje pokazatelja stanja i detekciju anomalija. Povezanost tih cjelina s ostalim projektnim aktivnostima prikazana je na slici 1.

Senzorski dio sustava planira se razviti kao višesenzorska konfiguracija. LiDAR SLAM tehnologija koristit će se za prostorno mapiranje i lokalizaciju robotske platforme, dok će višekanalni georadar omogućiti prikupljanje podataka o unutarnjoj strukturi zastora, podzastornog sloja i podloge. Uz to se predviđa uporaba ultrazvučnih senzora, inercijske mjerne jedinice i RTK-GNSS sustava za dodatno praćenje položaja, geometrije i kretanja platforme.



Slika 1. PERT dijagram projekta

Komunikacijski modul omogućit će prijenos podataka prema računalnom okruženju za obradu i prikaz rezultata. Razmatra se uporaba različitih komunikacijskih tehnologija, uključujući WiFi, LoRa i mobilne mreže, ovisno o količini podataka, dostupnosti signala i uvjetima primjene. Važan dio istraživanja bit će uspostava pouzdane komunikacijske arhitekture i vremenske sinkronizacije mjerenja. AI-RoboRAIL platforma razvijat će se za obradu višesenzorskih podataka i izdvajanje informacija korisnih za procjenu stanja infrastrukture. Planira se primjena metoda strojnog i dubokog učenja za predobradu podataka, detekciju anomalija, klasifikaciju mogućih oštećenja i analizu trendova degradacije, uz naglasak na povezivanju rezultata s inženjerski razumljivim pokazateljima.

4 Metodologija razvoja i validacije

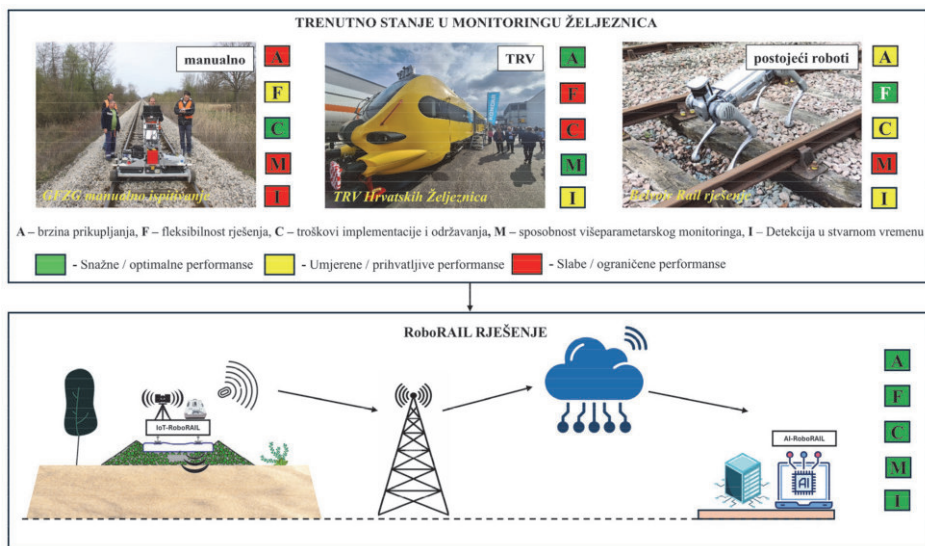
Metodologija razvoja RoboRAIL sustava temelji se na postupnom povezivanju projektiranja, izrade prototipa, razvoja algoritama i validacije u relevantnom okruženju. Takav pristup je važan jer se ne razvija samo pojedinačni mjerni uređaj, nego integrirani sustav koji mora zadovoljiti zahtjeve robotskog kretanja, višesenzorskog prikupljanja podataka, bežične komunikacije, računalne obrade i inženjerske interpretacije rezultata.

Prva faza obuhvaća pregled postojećih rješenja i definiranje zahtjeva sustava. Analizirat će se mjerni vlakovi, ručni i poluautomatski sustavi, mobilne mjerne platforme te eksperimentalna robotska rješenja. Cilj je izdvojiti tehnološka i metodološka ograničenja koja RoboRAIL treba adresirati, posebno nedostatak integriranih rješenja za istodobni nadzor gornjeg i donjeg ustroja.

Druga faza odnosi se na razvoj hardverskog prototipa IoT-RoboRAIL sustava. Razvoj obuhvaća mehaničku platformu, senzorski modul, komunikacijski modul i sustav napajanja. Senzori će se najprije ispitivati i kalibrirati zasebno, a zatim integrirati u jedinstvenu mjernu platformu. Za doktorsko istraživanje posebno je važno usklađivanje podataka različitih senzora jer taj korak određuje mogućnost kasnije geotehničke interpretacije.

Treća faza usmjerena je na razvoj AI-RoboRAIL softverskog rješenja. Ona uključuje prikupljanje i strukturiranje podataka, predobradu, vremensko i prostorno usklađivanje, izdvajanje značajki te razvoj algoritama za detekciju anomalija i analizu trendova degradacije. Budući da se u početnim fazama ne može očekivati velik broj označenih primjera svih mogućih oštećenja, važan istraživački smjer bit će razvoj postupaka koji mogu raditi i u uvjetima ograničenih skupova za učenje. Četvrta faza obuhvaća integraciju i validaciju sustava. Najprije će se provjeravati funkcionalnost senzorskih, komunikacijskih i energetske modula, a zatim rad cjelovitog prototipa. U laboratorijskim uvjetima analizirat će se stabilnost mjerenja, sinkronizacija podataka i pouzdanost prijenosa prema AI-RoboRAIL platformi. Nakon toga predviđena je validacija u relevantnom industrijskom okruženju, uključujući klimatsko-mehanička ispitivanja i testiranje na 1:1 željezničkoj dionici partnera u projektu.

Položaj RoboRAIL sustava u odnosu na postojeća rješenja prikazan je na slici 2. Slika pokazuje da se inovacijski potencijal projekta ne temelji na jednom izdvojenom senzoru ili pojedinoj tehnologiji, nego na integraciji robotske platforme, višesenzorskog nadzora gornjeg i donjeg ustroja, IoT prijenosa podataka i AI analitike. Upravo ta integracija čini znanstveni prostor doktorskog istraživanja.



Slika 2. Inovacijski potencijal RoboRAIL sustava u odnosu na postojeća rješenja

Cilj validacije nije prikaz završnog proizvoda, nego potvrda da se robotsko prikupljanje podataka, višesenzorska analiza i AI interpretacija mogu povezati u funkcionalan istraživački prototip za nadzor željezničke infrastrukture.

5 Očekivani znanstveni i praktični doprinos

Očekivani znanstveni doprinos rada povezan je s razvojem metodologije za integraciju heterogenih podataka prikupljenih robotskom platformom. U geotehničkom smislu poseban je izazov povezati površinske pokazatelje stanja pruge s informacijama o zastoru, podzastornom sloju, nasipu i podlozi. Takva integracija može omogućiti bolje razumijevanje odnosa između izmjerenih anomalija, promjena u geometriji kolosijeka i mogućih procesa degradacije u donjem ustroju.

Drugi važan doprinos odnosi se na primjenu algoritama umjetne inteligencije u uvjetima ograničenih i heterogenih skupova podataka. Kod željezničke infrastrukture oštećenja i nepovoljna stanja često su prostorno promjenjiva, rijetka i nedovoljno dokumentirana. Zbog toga je potrebno razvijati postupke koji kombiniraju inženjersku interpretaciju, statističku analizu, nenadzirano učenje i postupno učenje na temelju novih mjerenja.

Praktični doprinos očekuje se kroz razvoj istraživačkog prototipa koji može poduprijeti češći, objektivniji i sigurniji nadzor željezničke infrastrukture. Sustav bi mogao pomoći u ranom prepoznavanju sumnjivih zona, boljem usmjeravanju detaljnih pregleda i učinkovitijem planiranju održavanja. Time se otvara mogućnost prijelaza s pretežno reaktivnog održavanja prema podatkovno utemeljenom i prediktivnom pristupu.

6 Zaključak

U radu je prikazan RoboRAIL kao istraživački okvir za razvoj robotskog IoT sustava za nadzor stanja željezničke infrastrukture. Naglasak nije stavljen samo na razvoj tehničkog rješenja, nego na oblikovanje metodologije kojom se višesenzorski podaci mogu povezati s procjenom stanja gornjeg i donjeg ustroja pruge. Time se projekt izravno povezuje s doktorskim istraživanjem usmjerenim na geotehničku interpretaciju podataka prikupljenih autonomnom robotskom platformom.

Predloženi pristup temelji se na integraciji robotske platforme, višesenzorskog prikupljanja podataka, bežične komunikacije i algoritama umjetne inteligencije. Takva kombinacija omogućuje istodobno prikupljanje površinskih i podzemnih pokazatelja stanja pruge, što je posebno važno za rano prepoznavanje degradacijskih procesa koji se ne mogu pouzdano uočiti samo vizualnim pregledom.

Budući da je projekt u početnoj fazi provedbe, u radu nisu prikazani rezultati mjerenja, nego istraživački problem, planirana arhitektura sustava i metodologija raz-

voja i validacije. Očekuje se da će daljnji razvoj RoboRAIL sustava omogućiti znanstvenu provjeru postupaka višesenzorske fuzije podataka i detekcije anomalija, uz praktičan doprinos podatkovno utemeljenom održavanju pruga.

Zahvala

Ovaj rad izrađen je u okviru projekta RoboRAIL – Pametni autonomni robotski sustav za IoT nadzor stanja gornjeg i donjeg ustroja željezničke infrastrukture, oznaka PK.1.1.13.0018, financiranog kroz poziv Kolaborativna znanstvena istraživanja.

Literatura

- [1] Vranešić, K., Haladin, I., Burnać, K.: Influence of climate changes on railway superstructure, *GRAĐEVINAR*, 77 (2025) 1, pp. 43–67, doi: 10.14256/JCE.4123.2024.
- [2] Wang, H., Berkers, J., van den Hurk, N.: Study of an innovative method for track geometry inspection using a mobile inspection system, *Transportation Research Board 99th Annual Meeting*, Washington, D.C., 2020.
- [3] Kovačević, M.S., Bačić, M., Stipanović, I., Gavin, K.: Categorization of the Condition of Railway Embankments Using a Multi-Attribute Utility Theory, *Applied Sciences*, 9 (2019) 23, 5089, doi: 10.3390/app9235089.
- [4] Jing, G., Qin, X., et al.: Developments, Challenges, and Perspectives of Railway Inspection Robots, *Automation in Construction*, 138 (2022), 104242, doi: 10.1016/j.autcon.2022.104242.

Pregled modeliranja valova na Jadranu

Lovro Štefan¹, Damjan Bujak²

¹Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, lovro.stefan@grad.unizg.hr

²Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, damjan.bujak@grad.unizg.hr

Sažetak

Jadransko more poluzatvoren je bazen složene obalne morfologije i specifičnih vjetrovnih obrazaca koji određuju valnu klimu. Rad daje pregled istraživanja valne klime na Jadranu kroz tri pristupa: in situ i satelitska mjerenja, numeričke spektralne modele te metode strojnog učenja. Naglasak je na tehničkim karakteristikama primijenjenih numeričkih modela, koji su sustavno uspoređeni prema tipu i gustoći mreže, prostornoj razlučivosti i spektralnoj diskretizaciji. Posebno se razmatra uloga kvalitete vjetrovnih podataka, koja je u jadranskim uvjetima ključna za pouzdanost modelskih rezultata.

Ključne riječi: Jadransko more, valna klima, numeričko modeliranje valova, strojno učenje, vjetrovno forsiranje

Overview of wave modeling in the Adriatic

Abstract

The Adriatic Sea is a semi-enclosed basin with complex coastal morphology and specific wind regimes governing its wave climate. This paper reviews Adriatic wave climate research through three approaches: in situ and satellite measurements, numerical spectral models, and machine learning methods. The focus is on the technical characteristics of applied numerical models, systematically comparing grid type and density, spatial resolution, and spectral discretization. Attention is given to the role of wind data quality, which is critical for reliable modelling in Adriatic conditions.

Key words: Adriatic Sea, wave climate, numerical wave modelling, machine learning, wind forcing

1 Uvod

Jadransko more je poluzatvoreno rubno more Sredozemnog mora, a proteže se u duljini oko 800 km od Tršćanskog zaljeva na sjeverozapadu do Otrantskih vrata na jugoistoku. Prosječna širina iznosi oko 170 km. Zbog razvedene istočne obale, brojnih otoka i kanala te regionalnih vjetrova, valno polje prostorno je vrlo promjenjivo. Za razvoj valova posebno su važni bura, jak sjeveroistočni orografski kanaliziran vjetar ograničenog privjetrišta, te jugo, jugoistočni vjetar znatno dužeg privjetrišta jer puše uzduž cijelog bazena [1, 2].

Pouzdani valni podaci potrebni su za projektiranje obalnih i morskih građevina, procjenu ekstremnih stanja mora, upravljanje obalnim prostorom, analizu obalnih procesa, procjenu rizika od poplava itd. [3–5].

Valni parametri prate se *in situ* mjerenjima, satelitskom altimetrijom i modelskim bazama podataka. Plutače i platforme daju kvalitetne lokalne vremenske serije, ali je njihova prostorna pokrivenost ograničena. Satelitska mjerenja omogućuju provjeru i kalibraciju hindcast podataka, no primjena je ograničena u uskim i priobalnim područjima (do 20 km od obalne linije) [1, 6].

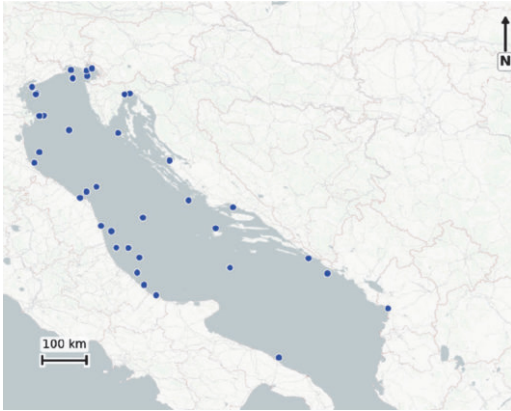
U suvremenim valnim analizama prevladava primjena spektralnih valnih modela treće generacije koji rješavaju jednadžbu ravnoteže valne akcije [7]. U poluzatvorenim i obalnim morima njihova točnost posebno ovisi o batimetriji i opisu obale te kvaliteti vjetrovnog forsiranja [5, 8]. Na Jadranu je vjetrovno forsiranje osobito važno zbog složene orografije i prostornih gradijenata vjetra. Više studija pokazuje da pogreške u vjetrovnim podacima vode do podcjenjivanja značajne valne visine, osobito tijekom ekstremnih događaja i za djelovanja bure i juga [3, 9, 10]. Prilikom modeliranja valne klime posebno je zahtjevnja parametrizacija površinskog loma valova (eng. *whitcapping*) koji u većini modela služi kao glavni parametar podešavanja kojim se kompenziraju pogreške u vjetrovnom forsiranju [5]. Cilj rada je pregled istraživanja valne klime i valnih modela na Jadranu s naglaskom na ulazne podatke, numeričke modele i njihove konfiguracije, a dan je i kratki pregled radova koji primjenjuju metode strojnog učenja. Odabrani su radovi s domenom na Jadranu ili sličnim područjima, relevantni za obalnu i pomorsku inženjersku praksu te modeliranje ekstremnih valnih uvjeta, pretežno objavljeni u posljednjih desetak godina.

2 Mjerenja valnih parametara na Jadranu

2.1 In situ mjerenja valografom

Mreža valografskih postaja na Jadranu relativno je rijetka (Slika 1). Na talijanskoj strani postoje oceanografska platforma Acqua Alta (45,31° N, 12,51° E) s dugim nizom mjerenja od 1979. godine te plutače talijanske mreže RON. Na hrvatskoj

strani DHMZ je 2024. pokrenuo mjerenja na pet meteorološko-oceanografskih ODAS plutača [11], čime je značajno unaprijeđena pokrivenost hrvatskog dijela Jadrana. Lončar i dr. [9] i Berbić i dr. [12] za stariji period koristili su Datawell MKIII GPS plutače na postajama V1 ($44^{\circ}44,5'N$, $13^{\circ}10,2'E$, sjever Jadrana, dubina 36 m) i V2 ($43^{\circ}29,3'N$, $16^{\circ}27,9'E$, Brački kanal, dubina 28 m). Isti tip plutače koristili su i Bujak i dr. na lokaciji u Riječkom zaljevu ($45,33^{\circ}N$, $14,39^{\circ}E$) [13]. Ćorak i dr. [14] uspoređuju četiri izvora podataka (Acqua Alta, RON, WorldWaves Atlas, ERA5) i utvrđuju znatne razlike s mjerljivim posljedicama na projektne parametre morskih konstrukcija.



Slika 1. Položaj valografskih postaja na Jadranu

2.2 Satelitska mjerenja

Satelitska altimetrija jedan je od izvora prostorno raspoređenih mjerenja značajnih valnih visina. Preko Copernicus Marine Servicea dostupan je L3 NRT proizvod [15] s globalnim valnim podacima iz satelitskih altimetara, dobiven obradom podataka misija Sentinel-6A, Jason-3, Sentinel-3A/3B, CryoSat-2, SARAL/AltiKa, CFOSAT i HY-2B. Sve misije homogenizirane su na referentnu misiju i kalibrirane korištenjem valografskih podataka. Proizvod pokriva globalna mora i oceane od 2021. godine s prostornom razlučivošću 1,4 km i u satnom intervalu. Ograničenje ovih podataka je, uz putanjski karakter mjerenja, relativno mala učestalost prolaza satelita nad uskim bazenima poput Jadrana.

3 Modeli valova na Jadranu

3.1 Numerički modeli

Spektralni valni modeli trećeg naraštaja čine većinu novijih primjena na Jadranu. U pregledanim radovima koriste se MIKE 21/SW (komercijalni model), WWM-III, WW3 i SWAN (javno dostupni), pri čemu se razlikuju svrha modela, domena, mreža, vjetrovno forsiranje i validacija. Tehničke karakteristike pojedinih konfiguracija prikazane su u tablici 1, dok se u nastavku tekstualno sažimaju svrha i glavni zaključci pojedinih radova.

Lončar i dr. [9] usporedili su rezultate modela MIKE 21/SW s mjerenjima na dvjema valografskim postajama. Rad pokazuje da je podudaranje snažno uvjetovano kvalitetom ALADIN-ova vjetrovnog polja. Lončar i dr. [16] su sličan model primijenili na prijelaz smjera vjetra iz juga u lebić ispred Riječkog zaljeva, a naglašena je osjetljivost valnog polja na promjene smjera vjetra u ograničenom bazenu. Dutour Sikirić i dr. [3] prikazali su sustav za prognozu valova na Jadranu temeljen na modelu WWM-III. Vrijednost rada je u primjeni detaljne mreže koja razrješava složenu geometriju. Validacija pokazuje uporabljivost sustava, ali uz podcjenjivanje vršnih valova, što se povezuje s podcijenjenim vjetrovnim forsiranjem. Barbariol i dr. [10] razvili su PELMO, kratkoročni prognostički sustav. Rad pokazuje da se u nedostatku posebno razvijenog regionalnog atmosferskog modela dio pogreške može smanjiti korekcijom (u radu kvantilno podudaranje) ulaznog vjetra. Benetazzo i dr. [17] primijenili su lanac COSMO-CLM-SWAN za usporedbu sadašnje i buduće valne klime Jadrana te zaključili da se očekuje opće smanjenje jakosti valova uz izraženu prostornu varijabilnost. Bonaldo i dr. [2] najprije su koristili vjetrovni energetski indeks kao zamjenu za ekstremna valna stanja, a zatim su Bonaldo i dr. [18] SWAN simulacijom analizirali promjene valnog režima u scenariju snažnih klimatskih promjena, s naglaskom na moguće učinke uz obale. Novije studije proširuju taj pristup složenijim modelnim lancima i višom razlučivošću. Ruol i dr. [4] analiziraju reprezentativne valove duž talijanske obale, Moulin i dr. [19] u okviru AdriaClim sustava koriste WW3 za razdoblje do 2050., a Denamiel i dr. [20] ispituju ekstremne olujne epizode metodom pseudo-globalnog zagrijavanja. Zajedničko im je da promjene valne klime nisu prostorno jednolike i da su obalna područja posebno osjetljiva na lokalne uvjete.

Iz tablice 1 vidljivo je da se jadranske primjene razlikuju prije svega po tipu mreže i namjeni: nestrukturirane mreže koriste se za detaljan opis otoka i kanala, dok strukturirane, računalno manje zahtjevne, prevladavaju u dugoročnim simulacijama. Kako pregledani radovi ne uspoređuju modele na istoj domeni i s istim vjetrovnim forsiranjem, njihova se točnost ne može izravno usporediti. Kao glavni izvor nesigurnosti ističe se kvaliteta vjetrovnog forsiranja, a parametrizacija whitemcappinga, glavni kalibracijski mehanizam modeliranih valnih visina [5], u dijelu radova nije eksplicitno navedena, što dodatno otežava usporedbu.

Tablica 1. Tehničke karakteristike numeričkih valnih modela primijenjenih na Jadranu

Rad	Model	Tip mreže	Horizontalna razlučivost	Frekvencije – razredi	White-capping	Smjerovi	Δt	Vjetar	Domena i vremenski raspon
Lončar i dr. [9]	MIKE 21/SW	Nestrukturirana (2 domene)	50–500 m / 750–4800 m	26; 0,08–0,95 Hz	prema Komenu	–	–	ALADIN 8 km, 3 h	Jadran; Brački kanal; 4.–6. 2008.
Lončar i dr. [16]	MIKE 21/SW	Nestrukturirana	200 m – 7500 m	28; 0,08–0,95 Hz	nije navedeno	–	–	ALADIN-HR 4 km, 3 h	Jadran (fokus Rijeka); 1998.–2001.
Dutour Sikirić i dr. [3]	WWM-III	Nestrukturirana 840bts.	10 m – 4 km	24; 0,06–1,69 Hz	prema Arduinu	36	300 s	ALADIN/HR 8 → 2 km	Jadran + 5 Jonsko; 2016. (operativno)
Barbariol i dr. [10]	WW3	Strukturirana pravokutna	0,025° (~2 km)	32; 0,07–1,34 Hz	prema Arduinu (ST4)	36	–	IFS-ECMWF 0,1° + Q-Q korekcija	Jadran + 5 Jonsko; 2018.–2019. (proгноza)
Benetazzo i dr. [17]	SWAN	Strukturirana	~1/13° (~8 km)	$24; f_{n+1}/f_n = 1,1; f_n = 0,05$ Hz	nije navedeno	36	–	COSMO-CLM ~14 km, 6 h	Jadran; 1965–1994 / 2070–2099 (A1B)
Bonaldo i dr. [2]	SWAN	Strukturirana	~2–7 km	– f; 0,05–0,5 Hz	nije navedeno	36	360 s	COSMO-CLM 8 km	Jadran; 1971–2000 / 2071–2100 (RCP 8,5)
Bonaldo i dr. [18]	SWAN	Strukturirana kurvilinearne 75×180	~2 km (S) – ~10 km (J)	25; 0,05–0,5 Hz	nije navedeno	36	360 s	COSMO-CLM 8 km, 6 h	Jadran; 1971–2000 / 2071–2100 (RCP 8,5)
Ruol i dr. [4]	WW3	Strukturirana pravokutna 361×280	0,025° (~2 km)	32; 0,07–1,34 Hz	nije navedeno	36	600/150/300/10 s	ERA5 + Q-Q (COSMO-CLM 8 km)	Jadran; 1981–2010 / 2021–2050 (RCP 4,5; 8,5)
Moulin i dr. [19]	WW3	Strukturirana (~2 km)	~2 km	30; 0,05–0,79 Hz	prema Janssensu	36	180 s	WRF 6 km	Jadran; 1992–2050 (RCP 8,5)
Denamiel i dr. [20]	SWAN (AdriSC)	Nestrukturirana (do 10 m)	10 m – 3 km	–	prema Komenu	–	–	WRF 1,5/3/15 km	Jadran; 36 trodnevnih epizoda 1979–2019

3.2 Modeli strojnog učenja

Metode strojnog učenja u modeliranju valova primjenjuju se kao brzi podatkovni modeli za kratkoročno prognoziranje valnih parametara, kao dopuna numeričkim modelima te kao surogatni modeli koji značajno smanjuju trajanje simulacija. Prednost im je učenje nelinearnih veza između vjetera, prethodnog stanja mora i valnih parametara, no pouzdanost ovisi o kvaliteti ulaznih podataka i validaciji. Mudronja i dr. [21] primijenili su višeslojne perceptronske mreže za prognoziranje H_s u točki središnjeg Jadrana. Optimalni model, s ulazima brzine vjetera i prethodne vrijednosti H_s , pokazao je dobro slaganje s mjerenjima. Berbić i dr. [12] usporedili su ANN i SVM za kratkoročno prognoziranje H_s : oba ML modela nadmašila su referentni numerički model MIKE 21/SW. Bujak i dr. [13] primijenili su interpretabilne modele temeljene na stablima odlučivanja za hindcast ekstremnih valnih visina u Riječkom zaljevu, postižući znatno bolju točnost od regionalnih reanaliza. Portillo Juan i dr. [22] upozoravaju da se u primjenama ANN modela u oceanskom inženjerstvu najčešće razmatra ulazna nesigurnost, dok su nesigurnosti strukture i parametara modela rjeđe obrađene. Preporučuju vrednovanje nesigurnosti. Mlakar i dr. [23] razvili su DELWAVE 1.0, deep-learning surogat za SWAN u klimatskim skalama na Jadranu. Model je treniran na COSMO-CLM i SWAN izlazima, postiže točnost od nekoliko centimetara za H_s i smanjuje računalnu cijenu, ali ostaje ograničen na točkaste izlaze duž obale.

4 Zaključak

Pregled istraživanja pokazuje da je modeliranje valova na Jadranu i dalje zahtjevno zbog poluzatvorenog oblika bazena, složene obalne morfologije, brojnih otoka i prostornih razlika u vjetrovnom polju. Numerički spektralni modeli trećeg naraštaja osnovni su alat za prognozu i analizu valne klime, ali njihova točnost uvelike ovisi o kvaliteti vjetrovnog forsiranja. To je posebno važno kod bure i juga, gdje nedovoljna razlučivost atmosferskih modela može dovesti do podcjenjivanja valnih visina i slabijeg opisa ekstremnih događaja. Ekstremni valni uvjeti ostaju važno pitanje za primjene u obalnom inženjerstvu. Problem je posebno izražen u međuotočnom i kanalskom prostoru hrvatske obale, gdje na valno polje snažno utječu ograničeno privjetrište, zaklanjanje otocima, lokalna batimetrija i nagle promjene smjera vjetera. Zbog toga su potrebna dodatna mjerenja valnih parametara, bolja validacija modela i povećanje prostorne razlučivosti u priobalju. Metode strojnog učenja pokazuju potencijal kao dopuna numeričkim modelima, ponajprije za brzu točkastu prognozu i korekciju sustavnih pogrešaka, dok se ne očekuje da u skoroj budućnosti zamijene numeričke modele u prostornom modeliranju valnog polja. Vjerojatan smjer daljnjeg razvoja je hibridno korištenje mjerenja, numeričkih modela i podatkovnih metoda.

Zahvala

Ovaj rad je financirala Hrvatska zaklada za znanost projektima (HR-ZZ-DOK-2025-02-3371) i (IP-2022-10-7598).

Literatura

- [1] Katalinić, M., Parunov, J.: Wave statistics in the Adriatic Sea based on 24 years of satellite measurements, *Ocean Engineering* 158 (2018), pp. 378–388.
- [2] Bonaldo, D., Bucchignani, E., Ricchi, A., Carniel, S.: Wind storminess in the Adriatic Sea in a climate change scenario, *Acta Adriatica* 58 (2017) 2, pp. 195–208.
- [3] Dutour Sikirić, M., Ivanković, D., Roland, A., Ivatek-Šahdan, S., Tudor, M.: Operational wave modelling in the Adriatic Sea with the Wind Wave Model, *Pure and Applied Geophysics* 175 (2018) 11, pp. 3801–3815.
- [4] Ruol, P., Martinelli, L., Favaretto, C., Barbariol, F., Benetazzo, A.: Representative and morphological waves along the Adriatic Italian coast in a changing climate, *Water* 14 (2022) 17, 2678.
- [5] Cavaleri, L., Abdalla, S., Benetazzo, A., et al.: Wave modelling in coastal and inner seas, *Progress in Oceanography* 167 (2018), pp. 164–233.
- [6] Barbariol, F., Davison, S., Falcieri, F.M., Ferretti, R., Ricchi, A., Sclavo, M., Benetazzo, A.: Wind waves in the Mediterranean Sea: an ERA5 reanalysis wind-based climatology, *Frontiers in Marine Science* 8 (2021), 760614.
- [7] World Meteorological Organization: Guide to Wave Analysis and Forecasting. WMO-No. 702. Geneva, 2018.
- [8] Cavaleri, L., Barbariol, F., Benetazzo, A.: Wind–wave modeling: where we are, where to go, *Journal of Marine Science and Engineering* 8 (2020) 4, 260.
- [9] Lončar, G., Ocvirk, E., Androžec, V.: Usporedba modeliranih i mjerenih površinskih vjetrovih valova, *Građevinar* 62 (2010) 3, pp. 197–206.
- [10] Barbariol, F., Pezzutto, P., Davison, S., Benetazzo, A., Bertotti, L., Carniel, S., Sclavo, M.: Wind-wave forecasting in enclosed basins using statistically downscaled global wind forcing, *Frontiers in Marine Science* 9 (2022), 1002786.
- [11] Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ): Državna mreža meteorološko-oceanografskih plutača, https://meteo.hr/podaci.php?section=podaci_vrijeme¶m=mop [pristupljeno: svibanj 2026.].
- [12] Berbić, J., Ocvirk, E., Carević, D., Lončar, G.: Application of neural networks and support vector machine for significant wave height prediction, *Oceanologia* 59 (2017) 3, pp. 331–349.

- [13] Bujak, D., Miličević, H., Lončar, G., Carević, D.: Hindcasting extreme significant wave heights under fetch-limited conditions with tree-based models, *Journal of Marine Science and Engineering* 13 (2025) 7, 1355.
- [14] Ćorak, M., Mikulić, A., Katalinić, M., Parunov, J.: Uncertainties of wave data collected from different sources in the Adriatic Sea and consequences on the design of marine structures, *Ocean Engineering* 266 (2022), 112738.
- [15] Copernicus Marine Service: Global Ocean L3 Significant Wave Height From NRT Satellite Measurements.
- [16] Lončar, G., Šreng, Ž., Miličević, H., Ostojić, S.: Increase of wave height due to transition in wind direction – example: Rijeka Bay, *Elektronički časopis Građevinskog fakulteta Osijek* 18 (2019), pp. 57–70.
- [17] Benetazzo, A., Fedele, F., Carniel, S., Ricchi, A., Bucchignani, E., Sclavo, M.: Wave climate of the Adriatic Sea: a future scenario simulation, *Natural Hazards and Earth System Sciences* 12 (2012) 6, pp. 2065–2076.
- [18] Bonaldo, D., Bucchignani, E., Pomaro, A., Ricchi, A., Sclavo, M., Carniel, S.: Wind waves in the Adriatic Sea under a severe climate change scenario and implications for the coasts, *International Journal of Climatology* 40 (2020) 12, pp. 5389–5406.
- [19] Moulin, A., Mentaschi, L., Clementi, E., Verri, G., Mercogliano, P.: Projections of the Adriatic wave conditions under climate changes, *Frontiers in Climate* 6 (2024), 1409237.
- [20] Denamiel, C., Pranić, P., Quentin, F., Mihanović, H., Vilibić, I.: Pseudo-global warming projections of extreme wave storms in complex coastal regions: the case of the Adriatic Sea, *Climate Dynamics* 55 (2020) 9–10, pp. 2483–2509.
- [21] Mudronja, L., Matić, P., Katalinić, M.: Data-based modelling of significant wave height in the Adriatic Sea, *Transactions on Maritime Science* 6 (2017) 1, pp. 5–13.
- [22] Portillo Juan, N., Matutano, C., Negro Valdecantos, V.: Uncertainties in the application of artificial neural networks in ocean engineering, *Ocean Engineering* 284 (2023), 115193.
- [23] Mlakar, P., Ricchi, A., Carniel, S., Bonaldo, D., Ličer, M.: DELWAVE 1.0: deep learning surrogate model of surface wave climate in the Adriatic Basin, *Geoscientific Model Development* 17 (2024) 12, pp. 4705–4725.

Potpuno održivi elementi drvenih konstrukcija od tvrdog drva

Jelena Galić¹, Vlatka Rajčić²

¹Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, jelena.galic@grad.unizg.hr

²Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, vlatka.rajcic@grad.unizg.hr

Sažetak

U ovom radu istražuje se mogućnost uporabe trnova od tvrdog drva u potpuno održivim konstrukcijskim elementima od tvrdog drva, bez primjene metalnih spojnih sredstava i sintetskih adheziva. Provedeno je eksperimentalno ispitivanje na 100 uzoraka trnova različitog promjera, duljine i površinske obrade s konačnim ciljem određivanja momenta plastifikacije. Rezultati pokazuju povećanje nosivosti i duktilnosti s porastom promjera trnova te povoljnije ponašanje narebrenih trnova u odnosu na glatke, što potvrđuje njihov potencijal za primjenu u održivim drvenim konstrukcijama.

Ključne riječi: tvrdo drvo, drveni trnovi, DLT; moment plastifikacije, duktilnost, spojevi, potpuna održivost

Fully sustainable structural elements made of hard-wood timber

Abstract

This paper examines the viability of hardwood dowels as structural connectors in fully sustainable all-timber structural assemblies, precluding the use of metal fasteners or synthetic adhesives. An experimental study was carried out on 100 dowel specimens varying in diameter, embedment length and surface treatment, with the primary objective of establishing the yield moment capacity. The results indicate an increase in load-bearing capacity and ductility with increasing dowel diameter, while threaded (ribbed) dowels exhibited more favorable behavior compared to smooth dowels, confirming their potential for application in sustainable timber structures.

Key words: hardwood, timber dowels, DLT; yield moment capacity, ductility, joints, fully sustainable

1 Uvod

Procjenjuje se da je više od 35% ukupno generiranog otpada u Europi povezano s građevinskom industrijom, što ukazuje na potrebu za promjenom postojećih pristupa projektiranju i gradnji [1]. U cilju smanjenja emisija stakleničkih plinova i potrošnje primarnih sirovina, građevinski sektor sve se više usmjerava prema održivim konceptima projektiranja i gradnje, pri čemu kružna ekonomija i njezina načela postaju temelj suvremenih strategija razvoja. Izvorno 3R načela (reduce, reuse, recycle) proširena su na 5R okvir (reduce, reuse, recycle, recovery, remanufacturing), čime se naglašava produženje životnog vijeka materijala i komponenti izvan samog recikliranja [1], [2].

Drvo kao građevni materijal ima izrazite prednosti u odnosu na materijale poput čelika i betona, prvenstveno zbog obnovljivosti, mogućnosti pohrane ugljika i znatno manjeg ekološkog otiska [3]. Istraživanja pokazuju da drvene konstrukcije zahtijevaju višestruko manju količinu energije za proizvodnju u odnosu na armiranobetonske i čelične sustave [4]. Razvoj inženjerskih drvenih proizvoda omogućio je primjenu drva u sve zahtjevnijim konstrukcijskim sustavima, uključujući višekratnice i građevine velikih raspona [5].

Međutim, konvencionalni sustavi, poput križno lameliranog drva (CLT), u velikoj se mjeri oslanjaju na sintetske adhezive i metalna spojna sredstva, što ograničava mogućnost recikliranja i ponovne uporabe takvih konstrukcijskih elemenata te smanjuje njihovu ukupnu održivost kroz životni ciklus [6]. Kao odgovor na navedene nedostatke razvijaju se potpuno (održivi) drveni sustavi, u kojima se elementi povezuju drvenim spojnim sredstvima, poput trnova ili tradicionalnih tesarskih spojeva [7].

Linijski i plošni elementi dobiveni spajanjem lamela uz pomoć drvenih trnova nazivaju se DLT (dowel laminated timber) elementi. Takvi elementi već su komercijalno dostupni, ali su i dalje predmet intenzivnih istraživanja zbog potrebe za optimizacijom mehaničkih svojstava i ekonomskom isplativosti [7]. Mehanička svojstva takvih sustava ovise o različitim čimbenicima, kao što su vrsta i dimenzije lamela/trnova, raspored trnova te smjer opterećenja [7].

U sklopu ovog istraživanja provest će se eksperimentalna i numerička analiza linijskih i plošnih elemenata od tvrdog drva povezanih drvenim spojnim sredstvima, uz variranje parametara kao što su tip, promjer, razmak i orijentacija trnova. Poseban naglasak bit će stavljen na određivanje nosivosti, krutosti i trajnosti elemenata, kao i na utjecaj vlage na njihovo ponašanje. Dobiveni rezultati usporedit će se s prethodno provedenim ispitivanjima elemenata od mekog drva, čime će se omogućiti sustavna evaluacija prednosti i ograničenja primjene tvrdog drva u potpuno održivim konstrukcijskim sustavima.

Osim mehaničkih svojstava, analizirat će se i održivost promatranih sustava pri-

mjenom analize životnog ciklusa (LCA), uzimajući u obzir emisije CO₂, potrošnju energije, trajnost i mogućnost ponovne uporabe [3], [8]. Cilj istraživanja je razvoj znanstveno utemeljenih smjernica za projektiranje potpuno održivih drvenih konstrukcijskih elemenata koji integriraju visoke mehaničke performanse s mogućnošću demontaže i ponovne uporabe, u skladu s principima kružne ekonomije.

2 Tvrdog drvo

Tvrdog drvo kao obnovljiv i ekološki prihvatljiv resurs dobiva sve veću pozornost u području nosivih drvenih konstrukcija. Dosadašnji razvoj masivnih drvenih sustava – ponajprije križno lameliranog drva (CLT) i lameliranog lijepljenog drva (glulam) – u velikoj je mjeri bio oslonjen na meko drvo, a konstrukcijsko-razredne vrste poput smreke, bora i jele najčešće se primjenjuju zbog svoje dostupnosti, ujednačenih mehaničkih svojstava i nižih troškova prerade [9]. Međutim, rastuća potražnja za masivnim drvenim materijalima te ograničenost resursa četinjača u pojedinim europskim regijama potiču istraživanje alternativnih vrsta drva, uključujući listače [10].

Iz tehničke perspektive, listače predstavljaju znatno heterogeniju skupinu drvnih vrsta koje u većini slučajeva pokazuju višu gustoću, u rasponu od približno 550 do 950 kg/m³ za listače sjeverne hemisfere poput bukve, hrasta, kestena, jasena i određenih vrsta eukaliptusa. Povećana gustoća rezultira značajno poboljšanim mehaničkim svojstvima, odnosno većom čvrstoćom i krutošću materijala [10].

Unatoč navedenim prednostima, primjena tvrdog drva u inženjerskim drvenim proizvodima još je uvijek ograničena. Jedan od glavnih razloga je taj što se tehnologija obrade mekogog drva mora u potpunosti zamijeniti tehnologijom prilagođenom obradi tvrdoga drva. Poseban izazov predstavlja razvoj potpuno održivih sustava bez uporabe metalnih spojnih sredstava i sintetskih adheziva.

Korištenje trnova od tvrdog drva za povezivanje linijskih i plošnih elemenata predstavlja jedno od mogućih rješenja za razvoj takvih sustava. Primjenom drvenih spojnih sredstava omogućuje se bolja mogućnost demontaže, recikliranja i ponovne uporabe konstrukcijskih elemenata u skladu s principima kružne ekonomije [7]. Istovremeno, povećana gustoća tvrdog drva može pozitivno utjecati na nosivost i deformabilnost spojeva.

Ovaj rad usmjeren je na ispitivanje ponašanja elemenata izrađenih u potpunosti od tvrdog drva, dok će se usporedba njihovih mehaničkih svojstava s prethodno ispitanim sustavima od mekogog drva provesti u sklopu daljnjih faza istraživanja. Primarni cilj istraživanja je ispitati izvedivost i učinkovitost tehnika lameliranja trnovima, kako bi se razvili linijski i plošni elementi visokih mehaničkih performansi i poboljšane održivosti.

3 Ispitivanje trnova od tvrdog drva za određivanja momenta plastifikacije

3.1 Priprema uzoraka

Uzorci za ispitivanje izrađeni su u skladu s normom EN 408:2010+A1:2012 [11]. Izrađeno je ukupno 100 uzoraka (10 serija po 10 uzoraka) koji se razlikuju po promjeru, duljini i vrsti završne obrade. Karakteristike uzoraka prikazane su u Tablici 1. Duljine uzoraka ovise o promjeru pojedine serije.

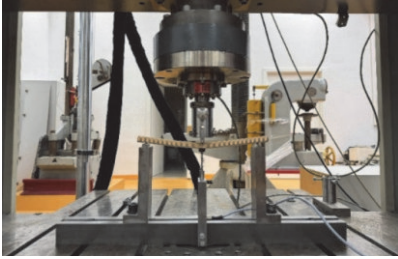
Tablica 1. Karakteristike ispitanih uzoraka i parametri ispitivanja

OZNAKA	BROJ KOMADA	ZAVRŠNA OBRADA	PROMJER [mm]	DULJINA [mm]	PROSJEČNA MASA [g]	PROSJEČAN VOLUMEN [cm ³]	PROSJEČNA GUSTOĆA [kg/m ³]	BRZINA NANOŠENJA OPTEREĆENJA [mm/min]
G-OP-408-10	10	glatki	10	210	11,83	16,49	717,26	1,80
N-OP-408-10	10	narebreni	10	210	11,28	16,49	683,91	1,80
G-OP-408-12	10	glatki	12	252	19,04	28,50	668,06	2,16
N-OP-408-12	10	narebreni	12	252	18,07	28,50	634,02	2,16
G-OP-408-14	10	glatki	14	294	32,07	45,26	708,61	2,52
N-OP-408-14	10	narebreni	14	294	31,57	45,26	697,56	2,52
G-OP-408-16	10	glatki	16	336	46,94	67,56	694,82	2,88
N-OP-408-16	10	narebreni	16	336	46,61	67,56	689,94	2,88
G-OP-408-20	10	glatki	20	420	95,31	131,95	722,34	3,60
N-OP-408-20	10	narebreni	20	420	94,74	131,95	718,02	3,60

3.2 Proces ispitivanja

Norma EN 408:2010+A1:2012 [11] predviđa provođenje testa na savijanje u četiri točke, dok se u provedenom istraživanju provodi ispitivanje na savijanje u tri točke, pri čemu su i dalje zadovoljeni uvjeti dimenzija uzoraka i brzine nanošenja opterećenja koji su zadani u spomenutoj normi. Cilj promjene načina opterećivanja je usporedba dobivenih rezultata nakon što se provede ispitivanje na savijanje u četiri točke te utvrđivanje razlike u dobivenim vrijednostima ovisno o načinu opterećivanja.

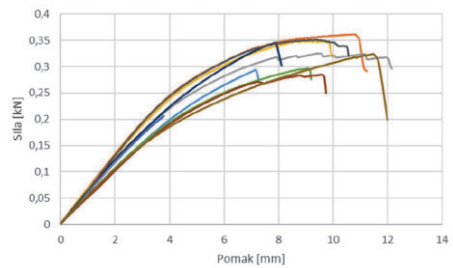
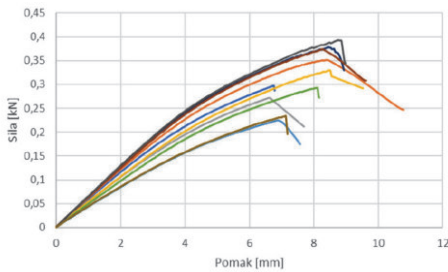
Uzorci su prilikom ispitivanja bili oslonjeni na dva mjesta pomoću metalnih oslonaca. Opterećenje je nanoseno preko zaobljene čelične pločice u sredini raspona. Na taj način dobiven je statički sustav u kojem drveni trn otkazuje pri dosezanju momenta loma. Opterećenje je nanoseno konstantnom brzinom koja ovisi o promjeru trna, a brzine za svaki pojedini tip uzorka prikazane su u tablici 1.



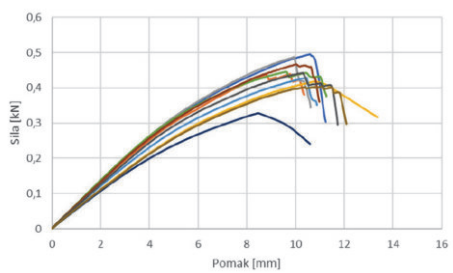
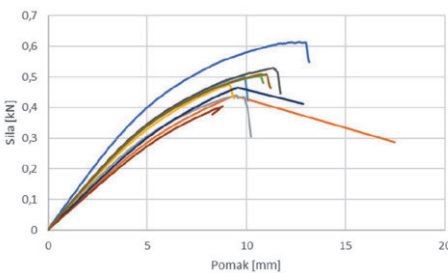
Slika 1. Princip nanošenja opterećenja na uzorak

3.3 Rezultati ispitivanja

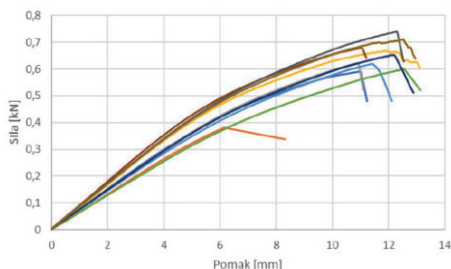
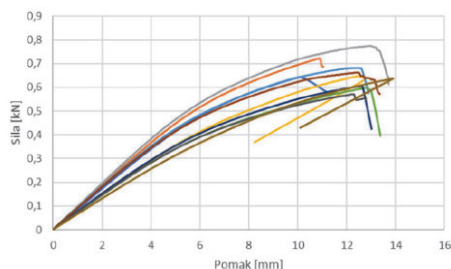
Obradom podataka generiranih uslijed ispitivanja dobivene su krivulje koje prikazuju odnos sile [kN] i pomaka [mm]. Za svaki pojedini uzorak iz serije prikazana je zasebna krivulja, kako bi se u daljnjim koracima ispitivanja mogli dobiti eksperimentalni parametri koji će se uspoređivati s proračunskim parametrima.



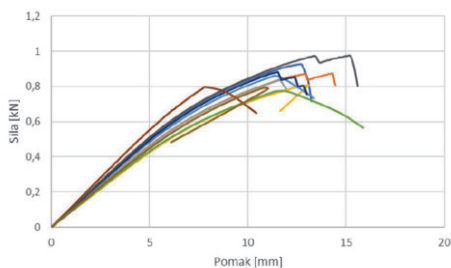
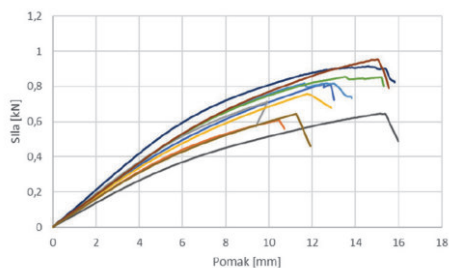
Slika 2. i Slika 3. Krivulja sila-pomak za G-OP-408-10 (lijevo) i za N-OP-408-10 (desno)



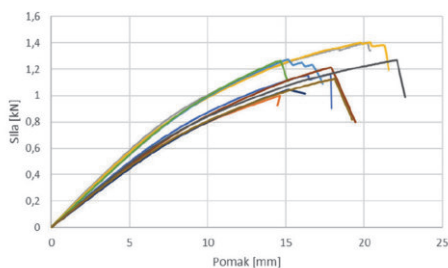
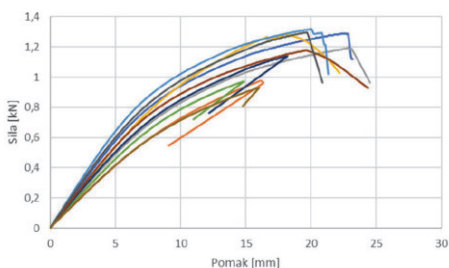
Slika 4. i Slika 5. Krivulja sila-pomak za G-OP-408-12 (lijevo) i za N-OP-408-12 (desno)



Slika 6. i Slika 7. Krivulja sila-pomak za G-OP-408-14 (lijevo) i za N-OP-408-14 (desno)



Slika 8. i Slika 9. Krivulja sila-pomak za G-OP-408-16 (lijevo) i za N-OP-408-16 (desno)



Slika 10. i Slika 11. Krivulja sila-pomak za G-OP-408-20 (lijevo) i za N-OP-408-20 (desno)

4 Zaključak

Provedeno ispitivanje pokazalo je očekivano ponašanje trnova u pogledu krutosti i maksimalne sile pri dosezanju loma, odnosno momenta plastifikacije. Dosezanje momenta plastifikacije jedan je od dva tipa otkaza u spojevima. Drugi tip otkaza, pritisak po omotaču rupe tvrdog drva, također će se ispitati u kasnijim fazama istraživanja.

Na prikazanim grafovima vidljivo je da je većina trnova pokazala relativno nagli otkaz pri dosezanju maksimalne sile. Određeni postotak (približno 11% ispitanih uzoraka) ponašao se potpuno krto. U višereznom spoju, kada je nekoliko lamela

povezano trnom, očekuje se veći stupanj plastičnog ponašanja samoga trna. Drveni trnovi imaju znatno manju duktilnost u odnosu na čelične trnove. S porastom promjera trnova, nosivost očekivano raste, uz neznatna odstupanja. Trnovi većeg promjera pokazuju veću duktilnost. Također, trnovi glatke površine imali su u prosjeku krtije lomove u odnosu na naborane trnove istoga promjera. Mogući uzrok tome je činjenica da se pri proizvodnji naboranih trnova koristi drvena građa minimalne zakrivljenosti (radi lakše obrade), što za posljedicu ima bolja mehanička svojstva.

Zaključuje se da su naborani trnovi primjereniji za korištenje u smislu mehaničkih svojstava i postizanja tražene duktilnosti sustava te zbog njihove površine koja osigurava bolju povezanost elemenata.

Nakon provođenja testa na savijanje u četiri točke bit će moguće definirati razliku u nosivosti ovisno o obliku opterećenja.

Konačno, proračunati moment plastifikacije trnova od tvrdog drva bit će jedan od parametara za formiranje baze podataka i parametarsku analizu krutosti i deformabilnosti te kapaciteta nosivosti trnovima lameliranih stupova, greda, zidova i ploča.

Literatura

- [1] European Commission. Circular Economy Action Plan: For a Cleaner and More Competitive Europe. Brussels: European Commission; 2020.
- [2] Finamore M, Oltean-Dumbrava C. Circular economy in construction – findings from a literature review. *Heliyon*. 2024;10(15):e34647.
- [3] Ramage MH, Burr ridge H, Busse-Wicher M, Fereday G, Reynolds T, Shah DU, Wu G, et al. The wood from the trees: the use of timber in construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;68:333–359.
- [4] Sathre R, O'Connor J. Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. *Environmental Science & Policy*. 2010;13(2):104–114.
- [5] Brandner R, Flatscher G, Ringhofer A, Schickhofer G, Thiel A. Cross laminated timber (CLT): overview and development. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2016;74(3):331–351.
- [6] Sotayo A, Bradley D, Bather M, Oudjene M, El-Houjeiry I, Guan Z. Development and structural behaviour of adhesive free laminated timber beams and cross laminated timber using compressed wood dowels. *Construction and Building Materials*. 2020;251:118990.

- [7] Sotayo A, Bradley D, Bather M, Sareh P, Oudjene M, El-Houjeiry I, Harte AM, et al. Review of state of the art of dowel laminated timber members and densified wood materials as sustainable engineered wood products for construction and building applications. *Developments in the Built Environment*. 2020;1:100004.
- [8] Cabeza LF, Rincón L, Vilariño V, Pérez G, Castell A. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;29:394–416.
- [9] Cornick J, Rogers L, Wheeler K. Increasing mass timber consumption in the U.S. and sustainable timber supply. *Sustainability*. 2022;14(1):381.
- [10] Aicher S, Christian Z, Dill-Langer G. Hardwood glulams – emerging timber products of superior mechanical properties. U: *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE 2014)*; 2014 Aug 10–14; Quebec City, Canada.
- [11] European Committee for Standardization. EN 408:2010+A1:2012: Timber Structures – Structural Timber and Glued Laminated Timber – Determination of Some Physical and Mechanical Properties. Brussels: CEN; 2012.

Analitički model poprečnog presjeka pravokutnih armiranobetonskih stupova s čeličnom ili GFRP uzdužnom armaturom pri ekscentričnom tlačnom opterećenju

Florim Istrefi¹, Tomislav Kišiček²

¹Astraplan d.o.o, florim.istrefi@student.grad.hr

²Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, tomislav.kisicek@grad.unizg.hr

Sažetak

U radu je prikazan analitički model poprečnog presjeka, temeljen na kompatibilnosti deformacija i ravnoteži unutarnjih sila, za procjenu interakcije uzdužne sile i momenta savijanja pravokutnih AB stupova s čeličnom ili GFRP uzdužnom armaturom i čeličnim sponama pri ekscentričnom tlačnom opterećenju. Analiza je provedena za dva presjeka C30/37, dimenzija 15×20 cm i 20×25 cm, s armaturom 4Ø14 i Ø8/100, za ekscentricitete $e=2, 4$ i 6 cm u smjeru veće dimenzije presjeka, uz primjenu EC2 i ACI/ACI 440 pristupa.

Ključne riječi: GFRP, čelik, AB stupovi, ekscentricitet, EC2, ACI, interakcija

Analytical cross-sectional model of rectangular reinforced concrete columns with steel or GFRP longitudinal reinforcement under eccentric compressive loading

Abstract

This paper presents an analytical cross-sectional model, based on strain compatibility and equilibrium of internal forces, for assessing the interaction between axial force and bending moment in rectangular reinforced concrete (RC) columns with steel or GFRP longitudinal reinforcement and steel ties under eccentric compressive loading. The analysis was carried out for two C30/37 concrete sections, 15×20 cm and 20×25 cm, reinforced with 4Ø14 longitudinal bars and Ø8/100 ties, for eccentricities $e=2, 4$ and 6 cm in the direction of the larger cross-sectional dimension, using EC2 and ACI/ACI 440 approaches.

Key words: GFRP, steel, RC columns, eccentricity, EC2, ACI, interaction

1 Uvod

Armiranobetonski stupovi izloženi istodobnom djelovanju osne sile i momenta savijanja proračunavaju se na temelju ravnoteže unutarnjih sila, kompatibilnosti deformacija i nelinearnog ponašanja materijala. Za stupova armiranih čeličnom armaturom postupci određivanja otpornosti presjeka, interakcije moment savijanja i osne sile i graničnih deformacijskih stanja definirani su u EC2 i ACI 318, dok EC8 propisuje zahtjeve za duktilnost, normiranu osne sile i seizmičko detaljiranje kritičnih područja [1–3].

GFRP armatura primjenjuje se zbog povećane trajnosti i otpornosti na koroziju. U odnosu na čelik, GFRP šipke imaju visoku vlačnu čvrstoću i malu masu, ali niži modul elastičnosti te linearno-elastično ponašanje do loma, bez područja popuštanje. Zbog toga se proračunski pristupi razvijeni za stupova armiranih čeličnom armaturom ne mogu izravno primijeniti na stupova armiranih GFRP armaturom [4].

Analitički radovi pokazuju da doprinos GFRP armature u tlaku još nije jednoznačno normiran. Noviji modeli upućuju na mogućnost njegova ograničenog uključivanja radi realnije procjene otpornosti [12–14]. Unatoč tom napretku, za male pravokutne stupova armiranih GFRP uzdužnom armaturom i poprečnom čeličnom armaturom još nedostaje jednostavan i projektno primjenjiv model presjeka usklađen s EC2/EC8 i ACI/ACI 440 pristupom.

2 Znanstveno-istraživački problem i ciljevi rada

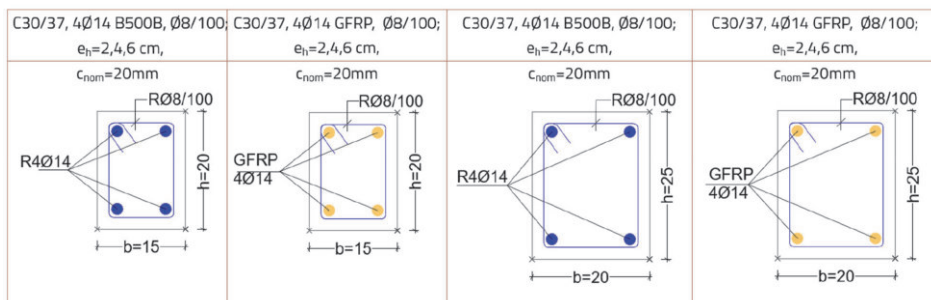
Znanstveni problem ovoga rada proizlazi iz činjenice da su postojeći normativni modeli za armiranobetonske stupove primarno razvijeni za stupove armirane čeličnom armaturom, dok stupovi armirani GFRP armaturom imaju bitno drukčiji mehanički odziv. [1–4]. Kod presjeka stupova armiranih čeličnom armaturom granično stanje može se tumačiti kroz popuštanje čelika, preraspodjelu napreznja i duktilni razvoj deformacija. Kod GFRP armature takav mehanizam ne postoji, jer šipke ostaju linearno-elastične do loma i ne osiguravaju plastičnu rezervu nosivosti [4–11].

Specifični ciljevi rada su: definirati analitički model poprečnog presjeka temeljen na kompatibilnosti deformacija i ravnoteži unutarnjih sila; izraditi dijagram interakcije moment savijanja i osne sile prema EC2 i ACI/ACI 440 pristupu; usporediti poprečne presjeke AB stupova armiranih čeličnom armaturom i AB stupova armiranih GFRP armaturom pri različitim ekscentricitetima u smjeru veće dimenzije presjeka, provjeriti primjenjivost EC8 zahtjeva za DCM i DCH detaljiranje analiziranih stupova; postaviti osnovu za nastavak doktorskog istraživanja kroz nelinearnu numeričku analizu i laboratorijska ispitivanja reprezentativnih stupova pri ekscentričnom opterećenju.

Buduća eksperimentalna ispitivanja trebaju obuhvatiti mjerenje deformacija betona i armature, razvoj pukotina, pomake, zakrivljenost, degradaciju krutosti, graničnu nosivost, učinak vlačnog ukrućenja betona između pukotina i način sloma. Dobiveni rezultati trebaju poslužiti za kalibraciju analitičkog i numeričkog modela te za ocjenu pouzdanosti projektnih pristupa prema EC2, EC8 i ACI 440.11-22 [1-13].

3 Metodologija

Numeričko istraživanje obuhvaća analizu interakcije osne sile i momenta savijanja za dva pravokutna poprečna presjeka armiranobetonskih stupova, prema geometriji i ulaznim podacima prikazanim na Slici 1, pri ekscentricitetima opterećenja u smjeru veće dimenzije presjeka, $e_h = 2, 4$ i 6 cm, uz primjenu EC2 i ACI/ACI 440 proračunskog pristupa te informativnu provjeru EC8 zahtjeva za DCM i DCH razinu duktilnosti.



Slika 1. Geometrija i ulazni parametri analiziranih presjeka

4 Analitički model, provjere i rasprava rezultata

Analitički model presjeka temelji se na pretpostavci da ravni presjeci nakon deformiranja ostaju ravni. Takva pretpostavka omogućuje povezivanje deformacijskog stanja presjeka s položajem neutralne osi, zakrivljenošću i raspodjelom naprezanja u betonu, čeličnoj armaturi i GFRP armaturi. Model se primjenjuje za pravokutne presjeke 15×20 cm i 20×25 cm, beton C30/37, uzdužnu armaturu 4Ø14, poprečnu čeličnu armaturu Ø8/100 i ekscentricitete opterećenja $e_h = 2, 4$ i 6 cm.

Deformacija ε_i na udaljenosti y_i od tlačnog ruba ovisi o položaju neutralne osi c i granične deformacije betona ε_{icu} a određuje se izrazom:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{cu} \frac{c - y_i}{c} \quad (1)$$

Kada je $y_i < c$, promatrano vlakno nalazi se u tlačnom području. Kada je $y_i > c$, deformacija poprima suprotan predznak i vlakno se nalazi u vlačnom području presjeka. Na taj se način za svaki položaj neutralne osi može odrediti raspodjela deformacija po visini presjeka.

Za beton se u EC2 pristupu može primijeniti dijagram naprezanje–deformacija betona u tlaku ili, u pojednostavljenom obliku, ekvivalentni pravokutni blok tlačnih naprezanja. Projektna tlačna čvrstoća betona f_{cd} je definirana, za pojednostavljeni tlačni blok rezultanta tlačne sile betona može se zapisati kao:

$$N_c = \eta \cdot f_{cd} \cdot b \cdot \lambda_c \quad (2)$$

Gdje:

N_c - rezultanta tlačne sile betona

$\eta \cdot f_{cd}$ - efektivna čvrstoća tlačnog bloka betona, faktor $\eta = 1,0$ za $f_{ck} \leq 50$ MPa

b - širina poprečnog presjeka

λ_c - efektivna visina tlačne zone

U ACI pristupu tlačni blok betona definira se izrazom:

$$N_c = 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a \quad (3)$$

Gdje:

N_c - rezultanta tlačne sile betona

$0,85 \cdot f'_c$ - efektivna čvrstoća tlačnog bloka betona

b - širina poprečnog presjeka

a - efektivna visina tlačne zone

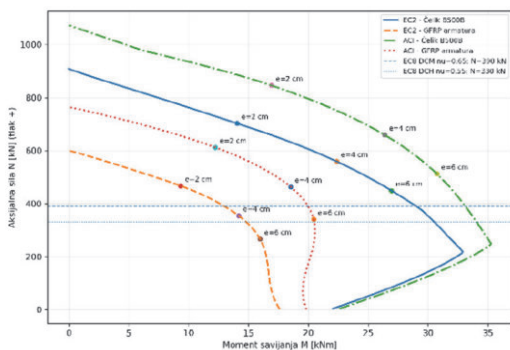
Za GFRP armaturu ključno je naglasiti da nema područje popuštanja. Zbog toga povećanje deformacije ne dovodi do plastične preraspodjele naprezanja kao kod čelične armature, nego do linearnog povećanja naprezanja do dosezanja granične deformacije ili loma. [1-4].

Kod ekscentričnog tlaka vanjski moment M_{Ed} je:

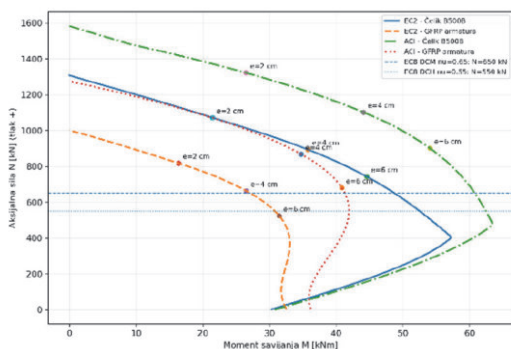
$$M_{Ed} = N_{Ed} \cdot e_h \quad (4)$$

4.1 N–M interakcija

Interakcijski dijagram dobiva se variranjem položaja neutralne osi c . Za svaki položaj neutralne osi određuju se deformacije, naprezanja, unutarnje sile i pripadni moment. Time se dobiva skup točaka ($N_{Rd} = M_{Rd}$) koji definira nosivost presjeka pri različitim kombinacijama osne sile i momenta savijanja.



Slika 2. N-M interakcijski dijagram za presjek 15x20 cm



Slika 3. N-M interakcijski dijagram za presjek 20x25 cm

Provjera razmaka poprečne armature u kritičnim područjima prema EC8 zahtjevima za DCM i DCH. Provjera obuhvaća omjer uzdužne armature, dimenzije omeđene jezgre, stvarni razmak poprečna armatura i najveći dopušteni razmak poprečna armature.

Rezultati pokazuju da stvarni razmak poprečna armatura $\varnothing 8/100$ ne zadovoljava zahtjeve za DCM i DCH. Stoga je za seizmičku primjenu potrebno predvidjeti gušći raspored poprečna armature u kritičnim područjima stupova.

5 Rezultati i rasprava

Provedena interakcijska analiza pokazuje da se povećanjem ekscentriciteta smanjuje dopuštena osna sila u svim analiziranim presjecima i za obje varijante uzdužne armature. Povećanje ekscentriciteta uzrokuje veći moment savijanja za istu vrijednost osna sile, pa se stanje presjeka postupno premješta iz tlačno dominantnog područja prema području u kojem je utjecaj savijanja izraženiji.

Za presjek 15×20 cm stupova armiranih čeličnom armaturom postiže osni nosivosti približno 702,51 kN, 559,10 kN i 449,06 kN za ekscentricitete 2 cm, 4 cm i 6 cm. Kod iste geometrije presjeka stupova armiranih GFRP armaturom postiže niže vrijednosti nosivosti, odnosno 467,07 kN, 354,51 kN i 266,21 kN. Ovi rezultati pokazuju da manji presjek AB stupova s GFRP uzdužnom armaturom ima ograničenu rezervu nosivosti, osobito pri većim ekscentricitetima.

Za presjek 20×25 cm stupova armiranih čeličnom armaturom postiže nosivosti približno 1072,17 kN, 893,85 kN i 742,99 kN. i za iste ekscentricitete stupova armiranih GFRP armaturom postiže 817,44 kN, 662,97 kN i 524,15 kN. U odnosu na presjek 15×20 cm, veći presjek osigurava znatno povoljniju rezervu nosivosti. EC8 provjera pokazuje da omjer uzdužne armature može biti prihvatljiv, ali razmak poprečna armatura $\emptyset 8/100$ nije dovoljan u kritičnim područjima za DCM i DCH razinu duktilnosti. Za presjek 15×20 cm dopušteni razmaci poprečna armatura iznose 51 mm za DCM i 34 mm za DCH. Za presjek 20×25 cm dopušteni razmaci iznose 76 mm za DCM i 50,7 mm za DCH. Iz toga proizlazi da bi za seizmičku primjenu analiziranih stupova bilo potrebno predvidjeti gušći raspored poprečne armature u kritičnim područjima.

Provedena analiza omogućuje jasnu usporedbu AB stupova armiranih čeličnom armaturom i AB stupova armiranih GFRP armaturom unutar istog geometrijskog, materijalnog i opterećenog okvira. Na taj se način mogu uočiti razlike u aksijalnoj nosivosti, momentnoj otpornosti, krutosti i očekivanom načinu sloma. Dobiveni rezultati predstavljaju osnovu za nastavak istraživanja i za buduću kalibraciju modela prema eksperimentalnim rezultatima.

6 Zaključak

Rezultati pokazuju da presjeci armiranih s GFRP uzdužnom armaturom imaju manju otpornost na djelovanje osne sile i momenta savijanja te manju deformacijsku rezervu u odnosu na presjeke armirane čeličnom armaturom iste geometrije. Razlog tome je linearno-elastično ponašanje GFRP armature do loma i izostanak popuštanja zbog čega se ne razvija plastična preraspodjela naprezanja, koja je karakteristična za čeličnu armaturu. Povećanjem ekscentriciteta s e_n od 2 cm na 6 cm smanjuje se uzdužna otpornost presjeka i povećava utjecaj savijanja, osobito kod manjeg presjeka 15×20 cm.

EC8 provjera pokazuje da postojeći razmak poprečna armatura $\emptyset 8/100$ ne zadovoljava zahtjeve za kritična područja pri DCM i DCH razini duktilnosti. Zbog toga je za seizmičku primjenu potrebno smanjiti razmak poprečne armature u kritičnim zonama, neovisno o tome koristi li se čelična ili GFRP uzdužna armatura.

Rad uspostavlja usporedni analitičko-projektantski okvir za procjenu interakcije moment savijanja i osne sile pravokutnih AB stupova armiranih čeličnom ili GFRP

uzdužnom armaturom pri ekscentričnom tlačnom opterećenju. Usporedbom istih geometrijskih, materijalnih i opterećenih parametara prema EC2 i ACI/ACI 440 pristupu jasno se izdvajaju razlike u otpornosti, deformacijskom odzivu i ograničenjima primjene GFRP armature. Rezultati pokazuju da se GFRP armatura ne može promatrati kao izravna zamjena za čelik, nego zahtijeva zasebnu analitičku interpretaciju zbog linearnog elastičnog ponašanja, izostanka popuštanja i ograničene deformacijske rezerve.

Za pouzdaniju ocjenu primjenjivosti potrebna su daljnja nelinearna numerička i eksperimentalna istraživanja, uključujući ekscentrično i cikličko opterećenje, razvoj pukotina, degradaciju krutosti, graničnu otpornost i način sloma, kako bi se omogućila kvalitetnija kalibracija i validacija proračunskih modela.

Literatura

- [1] CEN. EN 1992-1-1:2004, Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- [2] CEN. EN 1998-1:2004, Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- [3] ACI Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2019.
- [4] ACI Committee 440. ACI CODE-440.11-22: Building Code Requirements for Structural Concrete Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars - Code and Commentary. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2022.
- [5] Sun, L.; Wei, M.; Zhang, N. Experimental Study on the Behavior of GFRP Reinforced Concrete Columns under Eccentric Axial Load. *Construction and Building Materials*, 152, 214-225, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.159>.
- [6] Peng, F.; Xue, W. Reliability Analysis of Eccentrically Loaded Concrete Rectangular Columns Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars. *ACI Structural Journal*, 116(4), 275-284, 2019. <https://doi.org/10.14359/51715634>.
- [7] Tarawneh, A. N.; Dwairi, H. M.; Almasabha, G. S.; Majdalaweyh, S. A. Effect of Fiber-Reinforced Polymer-Compression Reinforcement in Columns Subjected to Concentric and Eccentric Loading. *ACI Structural Journal*, 118(3), 187-197, 2021. <https://doi.org/10.14359/51730526>.
- [8] Prajapati, G. N.; Farghaly, A. S.; Benmokrane, B. Performance of Concrete Columns Longitudinally Reinforced with Steel and GFRP Bars and Confined with GFRP Spirals and Cross Ties under Reversed Cyclic Loading. *Engineering Structures*, 270, 114863, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114863>.

- [9] Mahmoudabadi, N. S.; Bahrami, A.; Saghir, S.; Ahmad, A.; Iqbal, M.; Elchalakani, M.; Özkılıç, Y. O. Effects of Eccentric Loading on Performance of Concrete Columns Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer Bars. *Scientific Reports*, 14, 1890, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47609-4>.
- [10] Pang, L.; Han, Z.; Xiao, J.; Liu, Z.; Qu, W.; Dong, S. Bearing Capacity of Hybrid (Steel and GFRP) Reinforced Columns under Eccentric Loading: Theory and Experiment. *Buildings*, 14(8), 2472, 2024. <https://doi.org/10.3390/buildings14082472>.
- [11] Elkafrawy, M.; Gowrishankar, P.; Aswad, N. G.; Alashkar, A.; Khalil, A.; AlHamaydeh, M.; Hawileh, R. GFRP-Reinforced Concrete Columns: State-of-the-Art, Behavior, and Research Needs. *Buildings*, 14(10), 3131, 2024. <https://doi.org/10.3390/buildings14103131>.
- [12] Tavakol, M.; Haji Kazemi, H. Comparative Assessment of Concrete Columns Reinforced with Hybrid Steel-GFRP, GFRP, and Steel Bars under Cyclic Lateral Loading. *Structures*, 71, 108034, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.108034>.
- [13] Nguyen Van, N.; Dang Vu, H.; Nguyen Phan, D. Strength Prediction of Rectangular FRP-Reinforced Concrete Columns under Eccentric Loading. *Advances in Technology Innovation*, 11(1), 29-44, 2026. <https://doi.org/10.46604/aiti.2025.15124>.

Analitički model duktilnosti GFRP-armiranih betonskih greda s tlačnim područjem ovijenim otvorenim GFRP 2U sponama

Xhemshir Mulliqi¹, Tomislav Kišiček²

¹Europrojekt Plus, xhemshir.mulliqi1@student.grad.hr

²Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, tomislav.kisicek@grad.unizg.hr

Sažetak

U radu se predlaže analitički model duktilnosti betonskih greda armiranih šipkama od polimera ojačanog staklenim vlaknima (GFRP), s tlačnim područjem ovijenim otvorenim GFRP 2U sponama. Model uvodi topološki koeficijent η_{2U} , kojim se osnovni poprečni tlak ovijanja reducira na konačni proračunski tlak. Donja vrijednost koeficijenta određuje se iz deformacijske sposobnosti presjeka. Model je primjenjiv za procjenu dijagrama moment savijanja–zakrivljenost ($M-1/r$), pri čemu je dobiven raspon $0,41 \leq \eta_{2U} \leq 1,00$.

Ključne riječi: GFRP armatura, GFRP 2U spone, ovijeno tlačno područje, topološki koeficijent η_{2U} , moment savijanja-zakrivljenost, duktilnost

Analytical ductility model for GFRP-reinforced concrete beams with a compression zone confined by open GFRP 2U stirrups

Abstract

This paper proposes an analytical ductility model for concrete beams reinforced with glass fibre-reinforced polymer (GFRP) bars, with a compression zone confined by open GFRP 2U stirrups. The model introduces the topological coefficient η_{2U} by which the basic transverse confinement pressure is reduced to the final design pressure. The lower value of the coefficient is determined from the deformability of the section. The model is applicable for evaluating the bending moment–curvature diagram ($M-1/r$), resulting in the range $0.41 \leq \eta_{2U} \leq 1.00$.

Key words: GFRP reinforcement, GFRP 2U stirrups, confined compression zone, topological coefficient η_{2U} , bending moment–curvature, ductility

1 Uvod

Primjena armature od polimera ojačanog staklenim vlaknima (GFRP) povećava trajnost betonskih elemenata izloženih agresivnom okolišu. Zbog linearno elastičnog ponašanja do loma, izostanka granice popuštanja i ograničene plastične preraspodjele, duktilnost GFRP-armiranih elemenata ne može se tumačiti jednako kao kod čelične armature, nego kroz deformacijsku sposobnost betona, stanje tlačnog područja i razvoj zakrivljenosti [1–5].

Dosadašnja istraživanja savijanih greda armiranih polimerom ojačanim vlaknima (FRP) i ovijenog tlačnog područja pokazuju da oblik i učinkovitost poprečne armature bitno utječu na graničnu zakrivljenost i način sloma [3–5]. Posebno je važno smanjenje djelotvornosti FRP spona u savijenim dijelovima i sidrenju, što su razmatrali Ahmed i suradnici [6] te Imjai i suradnici [7]. Teorijska podloga za ovijeni beton preuzima se iz Manderova modela [8, 9].

Važno polazište predstavlja rad Renića i Kišičeka [10], u kojem je analizirana duktilnost betonskih greda armiranih FRP šipkama te povećanje njihove deformacijske sposobnosti ovijanjem tlačnog područja. U odnosu na taj koncept, ovaj rad razmatra grede s uzdužnom GFRP armaturom i otvorenim GFRP 2U sponama u tlačnom području.

Središnji doprinos rada jest uvođenje predloženog topološkog koeficijenta η_{2U} kao modelnog parametra za opis učinkovitosti otvorenih 2U spona. Koeficijent povezuje geometriju sustava, poprečni tlak ovijanja i ciljanu duktilnost presjeka. Dijagram moment savijanja–zakrivljenost ($M-1/r$) određuje se kontinuiranom presječnom analizom metodom postupnog povećanja zakrivljenosti.

2 Pretpostavke i analitička formulacija modela

Model je formuliran za savijane GFRP-armirane betonske grede bez vanjske uzdužne sile, uz linearno elastično ponašanje GFRP armature do loma. Učinak otvorenih GFRP 2U spona uvodi se preko poprečnog tlaka na tlačnu betonsku jezgru, pri čemu $\sigma_{2,FRP,0}$ označuje osnovni idealizirani tlak, a $\sigma_{2,FRP}$ konačni proračunski tlak nakon redukcije koeficijentom η_{2U} .

Efektivno naprezanje GFRP spona ograničava se prema smjernicama American Concrete Institute (ACI) 440 [11, 12], a osnovni poprečni tlak određuje se prema mehaničkoj analogiji Manderova pristupa [8, 9], uzimajući u obzir geometrijsku učinkovitost jezgre, volumetrijski omjer aktivnih grana i efektivno naprezanje spone. Budući da 2U sustav čine dvije odvojene U-spone, uvodi se topološki koeficijent η_{2U} kojim se osnovni tlak reducira na konačni proračunski tlak:

$$f_{fv} = \min(0,004 \cdot E_f; f_{fb}) \quad (1)$$

$$\sigma_{2,FRP,0} = \frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot \rho_v \cdot f_{fv} \quad (2)$$

$$\sigma_{2,FRP} = \eta_{2U} \cdot \sigma_{2,FRP,0} = \frac{1}{2} \cdot \eta_{2U} \cdot \alpha \cdot \rho_v \cdot f_{fv} \quad (3)$$

$$\eta_{2U} = \frac{\sigma_{2,FRP}}{\sigma_{2,FRP,0}} = \frac{2 \cdot \sigma_{2,FRP}}{\alpha \cdot \rho_v \cdot f_{fv}} \quad (4)$$

U izrazima je f_{fv} efektivno naprezanje GFRP spone ograničeno prema ACI 440, f_{fb} granično naprezanje u savijenom dijelu spone, E_f modul elastičnosti GFRP-a, α geometrijska učinkovitost ovijene jezgre prema Manderovu pristupu, ρ_v volumetrijski omjer aktivnih grana, a η_{2U} bezdimenzijski topološki parametar otvorene 2U konfiguracije $0 < \eta_{2U} \leq 1,00$.

3 Analitičko duktilnosno ograničenje koeficijenta η_{2U}

Kod GFRP armature izostaje granica popuštanja, pa se umjesto zakrivljenosti pri popuštanju uvodi referentna točka T_2 . Ona označuje stanje u kojem tlačno vlakno neovijenog betona doseže graničnu deformaciju prema Eurokodu 2 (EC2), a T_{2d} opisuje stanje nakon odlamanja zaštitnog sloja i lokalnog pada momenta pri približno istoj zakrivljenosti. Točka T_3 predstavlja granično stanje nakon aktiviranja ovijenog tlačnog područja, određeno dostizanjem granične deformacije ovijenog betona ili GFRP armature. Indeks duktilnosti zakrivljenosti određuje se kao omjer granične zakrivljenosti u točki T_3 i referentne zakrivljenosti u točki T_2 .

$$\mu_{(1/r)} = \frac{(1/r)_{T_3}}{(1/r)_{T_2}} \quad (5)$$

Kao donji analitički kriterij deformacijske sposobnosti ovijenog tlačnog područja usvaja se minimalni indeks duktilnosti zakrivljenosti prema izrazu (6), uz referentnu vrijednost iz literature [13].

$$\mu_{(1/r)} \geq \mu_{(1/r),\min} = 1,40 \quad (6)$$

Budući da je poprečni tlak ovijanja proporcionalan koeficijentu η_{2U} , uvodi se analitičko ograničenje: $\eta_{2U} \geq \eta_{2U,\min}$.

Za početnu analitičku procjenu pretpostavlja se linearna interpolacija između neovijenog stanja $\mu_{(1/r),0}$ i proračunate vrijednosti za $\eta_{2U} = 1,00$ označene kao $\mu_{(1/r),1}$:

$$\mu_{(1/r)}(\eta_{2U}) = \mu_{(1/r),0} + \eta_{2U} \cdot (\mu_{(1/r),1} - \mu_{(1/r),0}) \quad (7)$$

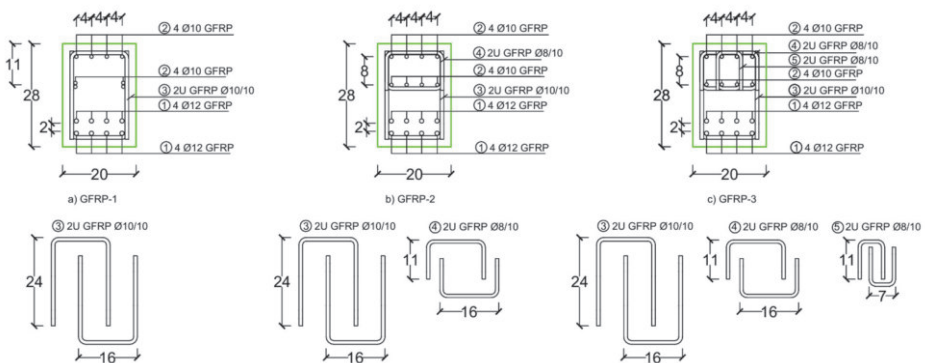
Iz uvjeta $\mu_{(1/r)}(\eta_{2U}) \geq \mu_{(1/r),\min}$ slijedi izraz za donju vrijednost koeficijenta $\eta_{2U,\min}$. Ako se konzervativno uzme $\mu_{(1/r),0} = 1,00$, dobiva se:

$$\eta_{2U,\min} = \frac{\mu_{(1/r),\min} - \mu_{(1/r),0}}{\mu_{(1/r),1} - \mu_{(1/r),0}} = \frac{0,40}{\mu_{(1/r),1} - 1} \quad (8)$$

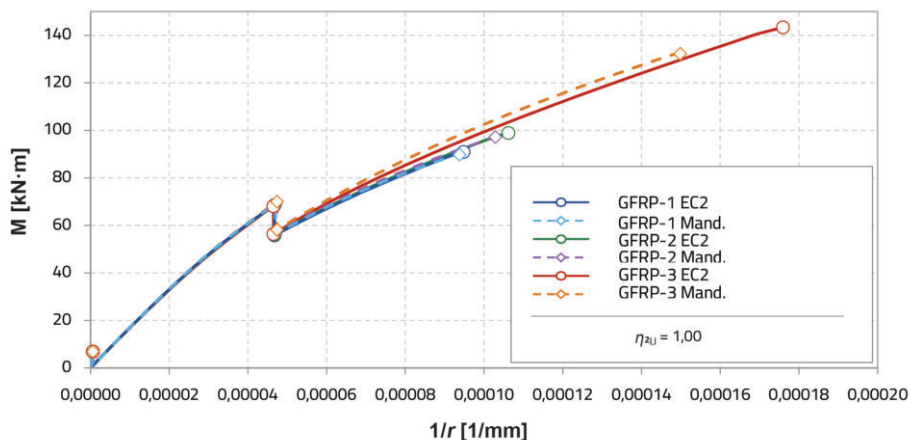
Za numeričku primjenu u ovom radu usvojena je referentna GFRP armatura GFRP-50-1000, s modulom elastičnosti $E_f = 50\,000$ MPa, vlačnom čvrstoćom $f_{fu} = 1000$ MPa i graničnom deformacijom $\varepsilon_{fu} = 0,020$. Učinkovito naprezanje GFRP spona u savijenom dijelu ograničeno je prema ACI 440 izrazom $f_{fv} = \min(0,004 \cdot E_f; f_{fb})$, pa je u proračunu uzeto $f_{fv} = 200$ MPa. Na temelju izraza (8) dobivene su donje vrijednosti $\eta_{2U,\min}$: 0,41 za GFRP-1, 0,34 za GFRP-2 i 0,19 za GFRP-3. Kao mjerodavna uzima se najnepovoljnija skupina GFRP-1, pa se konzervativno predlaže $\eta_{2U,\min} = 0,41$.

4 Rezultati i rasprava

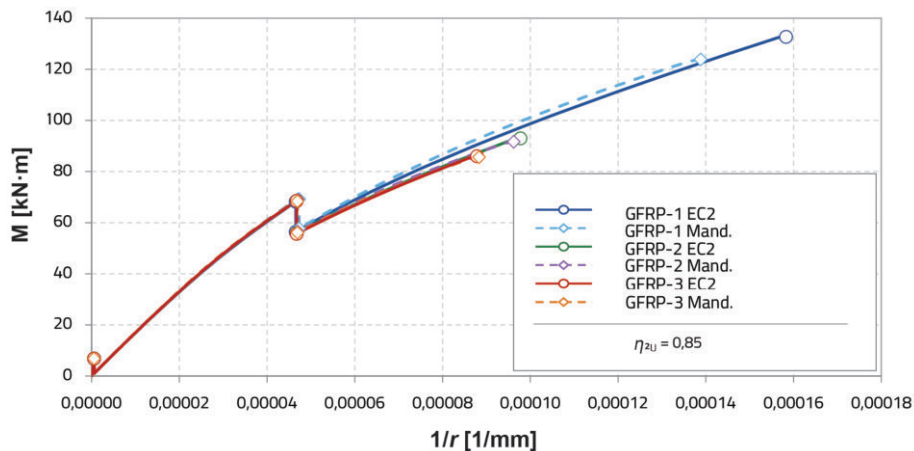
Model je primijenjen na tri skupine GFRP-armiranih greda s različitim konfiguracijama otvorenih 2U spona u tlačnom području (slika 1). $M-1/r$ dijagrami prikazani su za $\eta_{2U} = 1,00$ i $\eta_{2U} = 0,85$ prema modelima EC2 i Mander [8, 9, 14], pri čemu $\eta_{2U} = 1,00$ predstavlja idealizirano potpuno djelotvorno ovijanje, a $\eta_{2U} = 0,85$ reducirani poprečni tlak ovijanja.



Slika 1. Analizirani poprečni presjeci skupina GFRP-1, GFRP-2 i GFRP-3 s parovima otvorenih GFRP 2U spona



Slika 2. $M-1/r$ dijagrami skupina GFRP-1 do GFRP-3 prema EC2 i Manderu za $\eta_{2u} = 1,00$



Slika 3. $M-1/r$ dijagrami skupina GFRP-1 do GFRP-3 prema EC2 i Manderu za $\eta_{2u} = 0,85$

Tablica 1. Sažetak utjecaja topološkog koeficijenta na graničnu točku T, i indeks duktilnosti

Skupina	Model	$(1/r)T_3$ $\eta_{2u}=1,00$ [1/mm]	M $\eta_{2u}=1,00$ [kN·m]	$\mu_{(1/r)}$ $\eta_{2u}=1,00$	$(1/r)T_3$ $\eta_{2u}=0,85$ [1/mm]	M $\eta_{2u}=0,85$ [kN·m]	$\mu_{(1/r)}$ $\eta_{2u}=0,85$
GFRP-1	Eurokod 2	0,000094792	90,888	2,028	0,000087853	85,951	1,879
GFRP-1	Mander	0,000093770	89,767	1,996	0,000088306	85,601	1,882
GFRP-2	Eurokod 2	0,000106202	98,888	2,272	0,000097729	92,972	2,091
GFRP-2	Mander	0,000102884	97,184	2,187	0,000096199	91,612	2,047
GFRP-3	Eurokod 2	0,000175934	143,359	3,785	0,000158268	132,686	3,400
GFRP-3	Mander	0,000149848	132,231	3,161	0,000138807	123,855	2,935

Prikazani dijagrami moment savijanja–zakrivljenost ($M-1/\rho$) dobiveni su kontinuiranom presječnom analizom metodom postupnog povećanja zakrivljenosti, prema pristupu Sorića i Kišičeka [15].

5 Zaključak

Provedena formulacija pokazuje da se učinak otvorenih GFRP 2U spona opisuje topološkim koeficijentom η_{2U} kojim se osnovni idealizirani poprečni tlak reducira na konačni proračunski tlak. Za razmatrane konfiguracije dobiven je raspon $0,41 \leq \eta_{2U} \leq 1,00$, pri čemu je $\eta_{2U} = 0,41$ konzervativna donja granica, a $\eta_{2U} = 1,00$ idealizirano potpuno djelotvorno ovijanje. Dobiveni raspon omogućuje parametarsko vrednovanje različitih stupnjeva učinkovitosti 2U spona i njihova utjecaja na graničnu zakrivljenost, moment savijanja i indeks duktilnosti.

Najveća duktilnost dobivena je za skupinu GFRP-3, što potvrđuje pozitivan utjecaj intenzivnijeg ovijanja tlačnog područja. Model daje teorijsku osnovu za daljnju parametarsku analizu šireg raspona konfiguracija presjeka i parametara ovijanja te za buduću eksperimentalnu validaciju i kalibraciju topološkog koeficijenta η_{2U} .

Literatura

- [1] Elkafrawy, M., Gowrishankar, P., Aswad, N. G., Alashkar, A., Khalil, A., AlHamaydeh, M., Hawileh, R.: GFRP-Reinforced Concrete Columns: State-of-the-Art, Behavior, and Research Needs, *Buildings* 14 (2024) 10, 3131.
- [2] Prachasaree, W., Piriyaakootorn, S., Sangsrijun, A., Limkatanyu, S.: Behavior and Performance of GFRP Reinforced Concrete Columns with Various Types of Stirrups, *International Journal of Polymer Science* 2015 (2015), Article ID 237231.
- [3] Wang, H., Belarbi, A.: Ductility Characteristics of Fiber-Reinforced-Concrete Beams Reinforced with FRP Rebars, *Construction and Building Materials* 25 (2011) 5, pp. 2391–2401.
- [4] Jang, I. Y., Park, H. G., Kim, Y. G., Kim, S. S., Kim, J. H.: Flexural Behavior of High-Strength Concrete Beams Confined with Stirrups in Pure Bending Zone, *International Journal of Concrete Structures and Materials* 3 (2009) 1, pp. 39–45.
- [5] Priastiwi, Y. A., Imran, I., Nuroji: The Effect of Different Shapes of Confinement in Compression Zone on Beam's Ductility Subjected to Monotonic Loading, *Procedia Engineering* 125 (2015), pp. 918–924.
- [6] Ahmed, E. A., El-Sayed, A. K., El-Salakawy, E., Benmokrane, B.: Bend Strength of FRP Stirrups: Comparison and Evaluation of Testing Methods, *Journal of Composites for Construction* 14 (2010) 1, pp. 3–10.

- [7] Imjai, T., Garcia, R., Guadagnini, M., Pilakoutas, K.: Strength Degradation in Curved Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars Used as Concrete Reinforcement, *Polymers* 12 (2020) 8, 1653.
- [8] Mander, J. B., Priestley, M. J. N., Park, R.: Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, *Journal of Structural Engineering* 114 (1988) 8, pp. 1804–1826.
- [9] Mander, J. B., Priestley, M. J. N., Park, R.: Observed Stress-Strain Behavior of Confined Concrete, *Journal of Structural Engineering* 114 (1988) 8, pp. 1827–1849.
- [10] Renić, T., Kišiček, T.: Ductility of Concrete Beams Reinforced with FRP Rebars, *Buildings* 11 (2021) 9, 424, pp. 1–21.
- [11] ACI Committee 440: Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars, ACI 440.1R-15, American Concrete Institute, Farmington Hills, 2015.
- [12] ACI Committee 440: Building Code Requirements for Structural Concrete Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars—Code and Commentary, ACI CODE-440.11-22, American Concrete Institute, Farmington Hills, 2022.
- [13] Bui, L. V. H., Stitmannathum, B., Ueda, T.: Ductility of Concrete Beams Reinforced with Both Fiber-Reinforced Polymer and Steel Tension Bars, *Journal of Advanced Concrete Technology* 16 (2018) 11, pp. 531–548.
- [14] CEN: EN 1992-1-1:2023, Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings, Bridges and Civil Engineering Structures, European Committee for Standardization, Brussels, 2023.
- [15] Sorić, Z., Kišiček, T.: Dijagram moment savijanja – zakrivljenost za armiranobetonske grede, *Građevinar* 55 (2003) 4, pp. 207–215.

Adaptive self-balancing guyed mast systems

Vadym Nesterov¹, Ivan Čurković²

¹vadym.nesterov@student.grad.hr

²University of Zagreb Civil engineering Faculty, ivan.curkovic@grad.unizg.hr

Abstract

Guyed masts are highly efficient structures, but their behaviour strongly depends on guy-wire pretension, load asymmetry, icing and wind actions. Existing studies mainly focus on conventional systems with independently acting guy wires, whereas adaptive self-balancing configurations remain largely unexplored. This paper proposes a pulley-based guyed mast concept combining continuous cables and passive self-tensioning mechanisms. The study identifies theoretical foundations and modelling approaches for future investigations of load redistribution, dynamic behaviour and structural response under environmental actions.

Key words: guyed masts, adaptive structures, continuous cable systems, pulley mechanisms, force redistribution, geometric nonlinearity

Adaptivni samouravnotežujući jarbolni sustavi sa zategama

Sažetak

Jarboli sa zategama predstavljaju vrlo učinkovite konstrukcije, no njihovo ponašanje u velikoj mjeri ovisi o prednapinjanju zatega, asimetriji opterećenja, zaleđivanju i djelovanju vjetrova. Postojeća istraživanja uglavnom su usmjerena na konvencionalne sustave s međusobno neovisno djelujućim zategama, dok su adaptivne samouravnotežujuće konfiguracije još uvijek nedovoljno istražene. U radu se predlaže koncept jarbola sa zategama temeljen na sustavu kolotura, koji kombinira kontinuirane kablove i pasivne mehanizme samozatezanja. Istraživanje identificira teorijske osnove i pristupe modeliranju za buduća istraživanja preraspodjele sila, dinamičkog ponašanja i odziva konstrukcije pod utjecajem okolišnih djelovanja.

Ključne riječi: jarboli sa zategama, adaptivne konstrukcije, sustavi kontinuiranih kabela, mehanizmi s koloturima, preraspodjela sila, geometrijska nelinearnost

1 Introduction

Guyed masts are among the most efficient types of tall engineering structures and are widely used in telecommunication, broadcasting, meteorological, and monitoring systems. Owing to their high material efficiency, such structures enable the construction of facilities exceeding 100–600 m in height with significantly lower mass and cost compared to self-supporting towers. For this reason, guyed masts continue to represent an attractive solution for modern communication and environmental monitoring infrastructure.

Over the past decades, a considerable amount of research has been devoted to the analysis and design of guyed masts. Particular attention has been paid to the development of nonlinear analysis methods, the consideration of geometric nonlinearity of guy wires, the influence of pretension, dynamic wind effects, seismic loading, ice accretion, and structural stability. Significant contributions to the development of mast analysis methods have been made by Madugula et al. [1] on the nonlinear behaviour and dynamic response of guyed mast systems, as well as work by Hensley and Plaut [2], who investigated the influence of guy-wire parameters on structural stability and performance. A substantial body of research has also focused on the improvement of finite element models and the consideration of realistic operating conditions, including the paper [3] on the nonlinear dynamics of guyed masts under wind loading, the survey on the influence of geometric imperfections [4], and the research of Titus and Jayachandran [5] dedicated to the development of geometrically nonlinear analysis methods for guyed masts.

Despite the high level of development of current analysis methods, most existing studies consider guyed masts with fixed guy systems whose properties remain unchanged during operation. In recent years, increasing attention has been directed toward adaptive and intelligent structures capable of modifying their behaviour in response to external actions. Similar approaches are actively being developed in the fields of active vibration control of civil structures, adaptive cable-stayed systems, tensegrity structures, and robotic transformable systems. In particular, studies [6,7] demonstrate the potential for systems incorporating movable cables, pulleys, and force-redistribution mechanisms to enhance the reliability and adaptability of spatial structures.

At the same time, a review of the available literature indicates that the application of such principles to stationary guyed masts has received very limited attention. Comprehensive studies addressing the influence of pulley and block systems on force redistribution among guy wires, variations in structural stiffness, dynamic response, stability, and natural frequencies of mast structures are largely absent. Likewise, the potential of passive self-tensioning and automatic

compensation of force variations caused by wind, temperature changes, and ice accretion remains insufficiently investigated.

Therefore, an important scientific challenge is the formulation of adaptive self-balancing guyed mast systems employing pulley-based force redistribution mechanisms and passive self-tensioning of guy wires. The subsequent development of appropriate mathematical models and numerical analysis methods would enable the assessment of the influence of such systems on the stress–strain state, stability, and operational reliability of guyed mast structures, while also determining their potential for practical implementation in modern telecommunication and monitoring systems.

2 Limitations of conventional guyed mast systems

Traditional guyed masts are among the most efficient tall structures due to their low material consumption and high load-carrying capacity. However, numerous studies have shown that their operational performance is associated with several significant limitations. One of the primary issues is the high sensitivity of the structure to asymmetric wind and ice loads. Under non-uniform loading conditions, substantial force redistribution occurs among individual guy wires, leading to increased bending moments in the mast shaft, larger deformations, and local overloading of structural members [3,8]. Another characteristic feature is the pronounced geometric nonlinearity of the system resulting from the interaction between flexible guy wires and the compressed mast shaft. Variations in guy-wire tension, cable sagging, or partial loss of tension can significantly alter the global stiffness of the structure and complicate the prediction of its behaviour under loading [3].

A significant drawback of conventional guyed masts is the strong dependence of structural behaviour on the level of guy-wire pretension. Even relatively small deviations from the design values may result in changes in natural frequencies, deflections, and internal forces, thereby requiring continuous monitoring and periodic adjustment of the guy system [3]. Furthermore, studies have demonstrated a considerable sensitivity of guyed masts to initial geometric imperfections of the mast shaft. Deviations from verticality and erection inaccuracies may cause noticeable increases in stresses and reductions in structural reliability [4]. Another important issue is the vulnerability of conventional guyed masts to damage or failure of individual guy wires. The failure of a single guy wire results in a sudden redistribution of forces and may trigger progressive collapse of the entire system, as repeatedly reported in studies on the stability and failure behaviour of mast structures. Additional challenges arise under dynamic wind loading. Tall guyed masts are characterized by a large number of vibration modes who-

se properties strongly depend on guy-wire tension and operational conditions. The importance of accounting for cable nonlinearity and mast-guy interaction in dynamic analysis was demonstrated by Kaul [9]. These factors increase the likelihood of resonance phenomena and fatigue damage of structural components [3]. Ice accretion also has an adverse effect by increasing the mass of the system, reducing natural frequencies, and contributing to the development of unfavourable dynamic effects [8].

A review of existing studies indicates that the efficiency and reliability of conventional guyed masts largely depend on maintaining the appropriate level of guy-wire pretension and preserving the intended structural configuration. However, the system does not possess an inherent mechanism for the automatic redistribution of forces between different guy levels and directions. A change in loading applied to one group of cables affects the stress-strain state of the entire structure and requires consideration of the interaction among all system components. As a result, the required level of reliability is achieved through increased safety factors, strict erection requirements, and the need for periodic inspection and adjustment of guy-wire tensions during service. This limitation of conventional guyed mast systems may be regarded as the primary scientific motivation for the development of self-balancing structures employing continuous cables, pulleys, and automatic force redistribution mechanisms. The potential of such approaches is supported by studies on self-tensioning cable systems, interconnected prestressed structural components, and continuous cable systems with pulleys, which are reviewed in the following section.

3 Existing research on self-tensioning, combined guy systems and pulley-based load redistribution

The issue of maintaining stable tension in flexible elements has long been an important engineering challenge in various fields of technology. Railway overhead contact line systems represent a well-established practical example of passive self-tensioning, where counterweights and pulleys maintain nearly constant cable tension under thermal, seasonal and operational effects (Fig. 1) [10].

Additional evidence is provided by Johnston [11], who investigated a transmission tower support system with self-adjusting spring-supported guy wires (Fig. 2). The study showed that elastic elements in the guy-wire anchorage system can compensate force variations caused by external actions and structural displacements, reducing peak loads and improving force distribution.

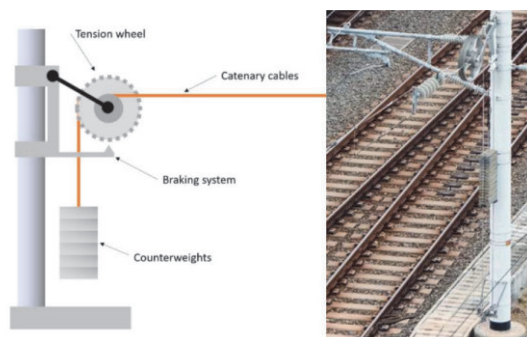


Figure 1. Constant-tension railway catenary system employing pulleys and counterweights for automatic compensation of cable elongation and contraction [10]

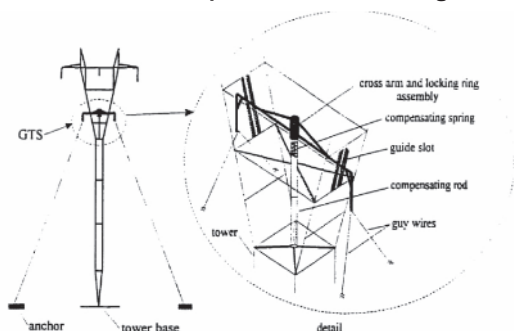


Figure 2. Guy-Wire Tension Stabilizer (GTS) with Spring-Based Self-Tensioning Mechanism [11]

Patent US4420917 [12] proposed a continuous guy-wire system for telescopic masts, in which guy wires of one level are routed through pulleys to equalize tension and simplify deployment. Although not intended for stationary masts under wind or ice loads, it confirms the feasibility of pulley-based force equalization. Further development of the self-tensioning concept is reflected in Patent US8627614B2 from 2014 [13], which proposed a spring-based guy-wire tensioning device capable of compensating cable length variations and maintaining the required tension level, confirming the feasibility of passive self-tensioning for guyed structures.

At the same time, studies of the nonlinear behaviour of guyed masts indicate that individual guy wires do not function independently. The papers [1-3] demonstrate that a change in force within a single guy wire causes redistribution of internal forces throughout the entire system, affecting mast deflections, natural frequencies, and the stress-strain state of the structure. Consequently, the guy system should be considered as an integrated interconnected structure rather than a collection of independent cables.

An important step toward deliberate force redistribution among different guy levels was presented by Jatulis et al. [14]. The authors investigated a mast in which several guy levels were interconnected through additional links between levels. Numerical simulations demonstrated a more uniform distribution of forces among guy wires, reduced bending moments in the mast shaft, and decreased sensitivity of the structure to variations in the tension of individual cables (Fig. 3). Although no pulleys or continuous cables were employed, this study represents one of the closest known investigations confirming the effectiveness of force redistribution between different guy levels.

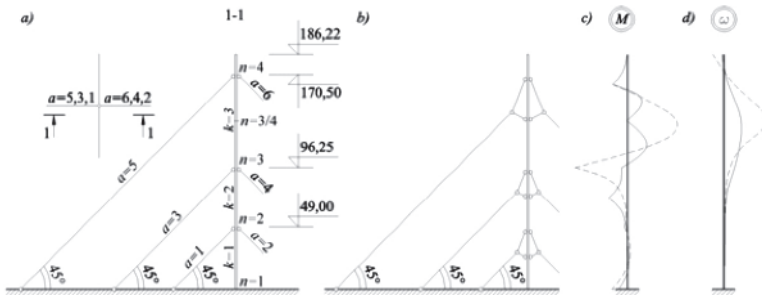


Figure 3. Comparison of a conventional guyed mast and a mast with combined guys: (a) traditional system; (b) combined guy system; (c) bending moment diagrams; (d) horizontal displacement diagrams. [14]

Further development of this concept can be observed in the work of Indriūnas et al. [15] who investigated a hybrid mast system in which a reinforced concrete shaft acts together with prestressed external stays and columns (Fig. 4). The results showed reduced top displacements, lower bending moments and increased spatial stiffness, confirming the potential of interconnected load-bearing systems for force redistribution in mast structures.

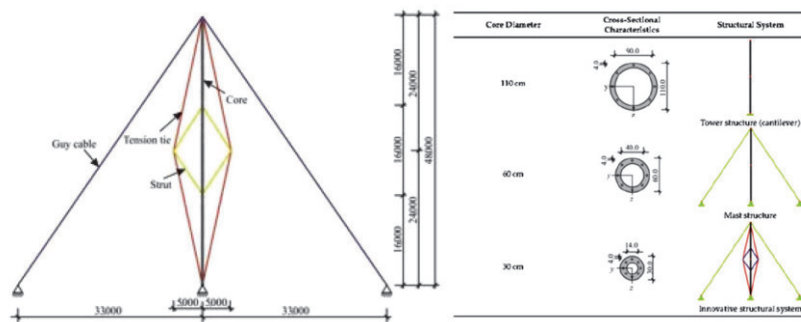


Figure 4. Innovative prestressed stayed-column mast system consisting of a reinforced concrete core, guy cables, tension ties and struts: a) Scheme; b) Comparison of conventional tower, guyed mast and innovative prestressed system. [15]

Patent CN116335676A [16] proposes a mechanically coupled cable system capable of automatically redistributing forces under external loading. Although the patent is not directly related to guyed masts, it demonstrates the feasibility of passive force equalization in systems of flexible elements.

Studies by Ma et al. [7] demonstrated that continuous cable systems with pulleys enable force redistribution and significantly influence the stiffness and mechanical behaviour of prestressed structures.

Existing studies confirm the feasibility of the individual components of the proposed concept. However, their integration within a single stationary guyed mast remains largely unexplored.

4 Mathematical framework and research methodology

Analysis of existing studies indicates that a sufficient theoretical foundation has been established for the modelling of self-balancing guyed masts employing continuous cables and pulley systems. The mathematical framework is based on several complementary research directions. The paper [7] is devoted to the derivation of equilibrium equations and the formulation of the tangent stiffness matrix for clustered tensegrity structures with continuous cables and pulleys, making it suitable as a basis for describing the stiffness characteristics of cable-pulley systems. The principles of sliding cable modelling are presented in the research [17], where it is shown that the free movement of a cable through guiding elements enables automatic force redistribution in a prestressed system.

Dynamic processes in cable-pulley systems were investigated in detail by Wang et al. [18], who developed a hybrid model of cable-pulley systems accounting for pulley kinematics and cable length variations. Further development of the theoretical framework was presented by Ma et al. [19], where nonlinear and linearized formulations of statics and dynamics for pulley-driven clustered tensegrity structures were developed and extended to finite-element analysis of systems with continuous cables and pulleys.

The practical feasibility of such an approach is further confirmed by the study [20], in which an algorithm for modelling continuous cables passing through pulley systems was developed and verified. The results obtained by the authors demonstrate the possibility of directly applying modern finite element software packages to the analysis of structures with force redistribution through pulleys. Based on the reviewed studies, a conceptual framework for modelling a self-balancing guyed mast can be formulated. Within the proposed framework, the mast shaft can be modelled using three-dimensional beam finite elements, while the guy wires can be represented by cable elements acting only in tension, accounting for pretension and geometric nonlinearity, and the pulleys can be introdu-

ced into the numerical model through sliding constraints. An additional degree of freedom, s_i , describes the movement of the cable through the i -th pulley and enables the modelling of force redistribution between individual branches of a continuous cable. The geometrically nonlinear formulation may be implemented within the Updated Lagrangian Formulation, while the system of nonlinear equations may be solved using the Newton–Raphson method.

The proposed framework provides a basis for geometrically nonlinear static, modal, wind and icing analyses, as well as optimization studies aimed at evaluating the performance of self-balancing guyed mast systems.

Thus, future research is directed not toward the development of a new mathematical framework, but rather toward the adaptation and application of existing methods for the analysis of cable–pulley systems to stationary guyed masts. This makes it possible to formulate the main scientific objective as the quantitative assessment of the influence of continuous cables and pulley systems on the stress–strain state, dynamic characteristics, and operational reliability of guyed mast structures.

5 Conclusion

The conducted analysis indicates that individual components of the self-balancing guyed mast concept already possess theoretical, experimental, and practical justification. However, their integration into a unified system of automatic force redistribution for stationary guyed mast structures remains largely unexplored. The development and investigation of such structures represent a promising research direction that has the potential to expand the design capabilities of next-generation adaptive guyed mast systems. The proposed concept provides a basis for future numerical and experimental investigations aimed at evaluating the influence of continuous cables and pulley systems on the behaviour of guyed mast structures under operational and environmental loading conditions.

References

- [1] Madugula, M.K.S., Wahba, Y.M.F., Monforton, G.R.: Dynamic Response of Guyed Masts, *Engineering Structures*, 20 (1998) 12, pp. 1097–1101.
- [2] Hensley, G.M., Plaut, R.H.: Three-Dimensional Analysis of the Seismic Response of Guyed Masts, *Engineering Structures*, 29 (2007) 9, pp. 2254–2261. DOI: 10.1016/j.engstruct.2006.11.019.

- [3] Ballaben, J.S., Guzmán, A.M., Rosales, M.B.: Nonlinear Dynamics of Guyed Masts under Wind Load: Sensitivity to Structural Parameters and Load Models, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 169 (2017), pp. 128–138. DOI: 10.1016/j.jweia.2017.07.012.
- [4] Matuszkiewicz, M.: Calculation of Guyed Masts in Accordance with EN 1993-3-1 Standard Taking into Account Mast Shaft Geometrical Imperfections, *Engineering Structures*, 33 (2011) 6, pp. 2044–2048. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.02.042.
- [5] Titus, H.M., Jayachandran, S.A.: A Flexibility Approach for Geometric Nonlinear Static Analysis of Guyed Masts, *Structures*, Vol. 70, 2024, Article 107842.
- [6] Błachowski, B., Gutkowski, W.: Optimal Vibration Control of Guyed Masts, *Proceedings of the XXI ICTAM – International Congress of Theoretical and Applied Mechanics*, Warsaw, Poland, 2004.
- [7] Ma, S., Chen, Y., Chen, M., Skelton, R.E.: Equilibrium and Stiffness Study of Clustered Tensegrity Structures with the Consideration of Pulley Sizes, *Mechanism and Machine Theory*, 169 (2022), Article 104627.
- [8] Yapar, Ö.: Analysis of Earthquake Loading, Wind Loading and Ice Loading Effects on Guyed Masts, Master of Science Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2010.
- [9] Kaul, R.: Dynamic Analysis of Guyed Towers Subjected to Wind Loads Incorporating Nonlinearity of the Guys, Master of Science Thesis, Texas Tech University, Lubbock, USA, 1999.
- [10] RIBE GmbH & Co. KG. 2024. Tension Wheel with Integrated Cable Brake. Schwabach, Germany. Available at: https://ribe.de/fileadmin/user_upload/RIBE/Downloads/englisch/EL/RE_Pro_Radspanner_2024_EN_fin.pdf
- [11] Johnston, A.G.: Support of Guyed Transmission Tower Using Self-Adjusting Sprung Guy Wires, Master of Science Thesis, University of Manitoba, Winnipeg, Canada, 1998.
- [12] United States Patent US4420917: Guying Arrangement for Telescoping Mast Structures, United States Patent and Trademark Office, 1983.
- [13] United States Patent US8627614B2: Spring Tensioning Device for Guyed Structures, United States Patent and Trademark Office, 2014.
- [14] Jatulis, D., Kamaitis, Z., Juozapaitis, A.: Static Behaviour Analysis of Masts with Combined Guys, *Journal of Civil Engineering and Management*, 13 (2007) 3, pp. 177–182.
- [15] Indriūnas, S., Kliukas, R., Juozapaitis, A.: Behavioral Analysis of a Mast with a Combined Prestressed Stayed Columns System and Core of a Spun Concrete Circular Cross-Section, *Buildings*, 13 (2023) 9, Article 2175.

- [16] China Patent CN116335676A: Self-Adaptive Multi-Cable Tension Balancing System with Automatic Force Redistribution, China National Intellectual Property Administration, 2023.
- [17] Bel Hadj Ali, N., Rhode-Barbarigos, L., Pascual Albi, A.A., Smith, I.F.C.: Active Tensegrity Structures with Sliding Cables: Static and Dynamic Analysis, *Engineering Structures*, 33 (2011) 3, pp. 866–879.
- [18] Wang, J., Qi, Z., Wang, G.: Hybrid Modeling for Dynamic Analysis of Cable–Pulley Systems with Time-Varying Length Cable and Its Application, *Journal of Sound and Vibration*, 406 (2017), pp. 277–294.
- [19] Ma, S., Chen, M., Dong, Y., Yuan, X., Skelton, R.E.: Statics and Dynamics of Pulley-Driven Tensegrity Structures with Sliding Cable Modeling, *Applied Mathematical Modelling*, 130 (2024), pp. 561–590.
- [20] Štekbauer, H., Němec, I.: A New Cable–Pulley Algorithm in RFEM, *Strojnícky časopis – Journal of Mechanical Engineering*, 66 (2016) 2, pp. 87–100.

Priključci s vijcima u navojnim rupama izrađenim u čeličnim elementima standardne i visoke čvrstoće

Marko Ptiček¹, Davor Skejić²

¹O.G. Design and Consulting d.o.o., marko.pticek@gmail.com

²Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, davor.skejic@grad.unizg.hr

Sažetak

Druga generacija Eurokoda za projektiranje priključaka čeličnih konstrukcija sadrži odredbe za primjenu vijaka u navojnim rupama, uključujući zahtjeve za minimalnu duljinu prihvata navoja. Kao specifična vrsta slijepih vijaka, vijci u navojnim rupama postaju praktički jedini vijčani sustav obuhvaćen normama za projektiranje čeličnih konstrukcija bez standardizirane matice. Rad donosi pregled istraživanja priključaka s vijcima u navojnim rupama s posebnim naglaskom na minimalnu duljinu prihvata navoja i ograničenja koja proizlaze za primjenu čelika visoke čvrstoće.

Ključne riječi: EN 1993-1-8, vijci u navojnim rupama, duljina prihvata navoja, čelik visoke čvrstoće

Joints with bolts in tapped holes made in standard and high-strength steel members

Abstract

The second generation of Eurocode for design of steel joints includes provisions for bolts in tapped holes (BTH), including requirements for minimum thread engagement length. As a specific form of blind bolting, BTH will thus become practically the only bolting system covered by steel design provisions that does not use a standardised nut. The paper reviews research on BTH joints, with particular emphasis on minimum thread engagement length and the resulting limitations for the use of high-strength steel.

Key words: EN 1993-1-8, bolts in tapped holes, thread engagement length, high-strength steel

1 Uvod

Cijevni čelični stupovi su u usporedbi sa stupovima otvorenih presjeka (I profili i H profili) superiorni po pitanju torzijske krutosti, posjeduju veće momente tromosti te se njihovom primjenom ostvaruje veća vitkost stupova, odnosno arhitektonska vizura prostora. Osim toga, upotrebom cijevnih stupova ostvaruje se bolji omjer nosivosti konstrukcije i utroška materijala, a u slučaju izvedbe cijevnih stupova ispunjenih betonom, njihovu nosivost i vatrootpornost moguće je dodatno poboljšati. Još jedan argument za odabir cijevnih profila za stupove je i njihova estetika. Bez obzira na navedene prednosti, potencijal primjene cijevnih profila nije u potpunosti iskorišten zbog kompleksnije izvedbe priključaka, tj. nemogućnosti pristupa unutrašnjosti cijevi za ugradnju standardnih vijaka kod priključaka nosač-stup s čeonim pločama [1, 2].

Priključci s čeonim pločama lako su primjenjivi za spajanja čeličnih nosača na stupove otvorenog H-profila jer otvoreni presjek stupa omogućuje nesmetan pristup za ugradnju vijčanih sklopova te se vijčani spoj lako ostvaruje preko pojasnice stupa. U slučaju cijevnih stupova, vijčani se sklop ne može ugraditi zbog nemogućnosti pristupa unutrašnjosti stupa.

Alternativa je otvaranje privremene rupe na licu stupa za pristup vijcima s unutarnje strane ili različita rješenja koja uključuju zavarivanje na lice stupa, npr. segment zavarene grede ili ekvivalentne zavarene ploče. Međutim, rješenja koja uključuju naknadno zavarivanje dovode do povećanja troškova, a izgledno i u mnogim slučajevima nužno zavarivanje u blizini rubova hladno oblikovanih cijevnih profila smanjuje duktilnost te povećava rizik od krtog loma [1].

Slijepi vijci su konstrukcijska spojna sredstva koja se koriste kada je pristup moguć samo s jedne strane te su kao takvi alternativa za spajanje greda s čeonim pločama na cijevne stupove jer ih je moguće ugraditi i zategnuti s vanjske strane stupa, tj. bez potrebe za pristupom unutrašnjosti cijevi za ugradnju matice. Na temelju ovog principa, standardne vijke moguće je koristiti kao specifičan tip slijepih vijaka i ugraditi ih s vanjske strane cijevnog stupa izravno u rupu s izvedbenim navojima. Navoji urezani po plaštu unutrašnjosti rupe direktno 'sidre' vijke bez matica koje se koriste u standardnim vijčanim sklopovima. Stoga se ovakva vrsta vijčanih sklopova naziva vijci u navojnim rupama (engl. *Bolts in Tapped Holes* - BTH).

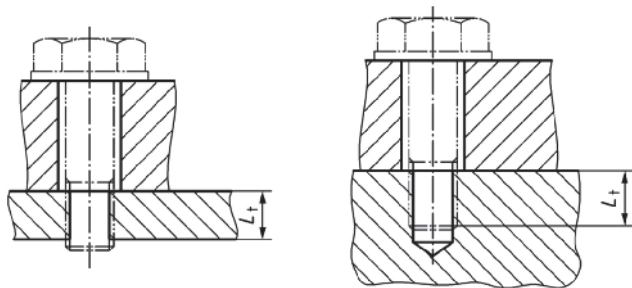
Cilj ovog rada je pregled dosadašnjih istraživanja i spoznaja o BTH priključcima, s naglaskom na problematiku minimalne duljine prihvata navoja i ograničenja koja iz toga proizlaze za primjenu čelika visoke čvrstoće. Rad je po svojoj prirodi pregledan te predstavlja polazište i teorijsku podlogu za šire istraživanje priključaka s vijcima u navojnim rupama koje obuhvaća eksperimentalna, numerička i probabilistička ispitivanja.

2 Vijci u navojnim rupama

Općenito, slijepi vijci nisu standardizirani niti obuhvaćeni u aktualnoj europskoj normi za projektiranje priključaka čeličnih konstrukcija EN 1993-1-8 [3]. Trenutno je u primjeni nekoliko komercijalnih sustava slijepih vijaka, kao što su Holo-bolt, Extended Holo-bolt, Ajax ONESIDE, Molabolt, BOM fastener, Blind Bolt i Huck Bolt. Detaljan pregled navedenih sustava slijepih vijaka dan je u [4].

U sklopu razvoja druge generacije norme Eurokod 3, zahtjevi za primjenu vijaka u navojnim rupama dani su u novoj verziji norme Eurokod 3, dio 1-8: FprEN 1993-1-8 [5]. Na taj će način, za razliku od mnogih komercijalnih proizvoda iz područja slijepih vijaka koji su pokriveni tehničkim specifikacijama proizvođača, BTH biti praktički jedini normirani vijčani sustav bez standardne matice.

BTH priključci mogu se podijeliti u dvije skupine s obzirom na vrstu navojne rupe: (i) prolazna navojna rupa i (ii) slijepa navojna rupa, Slika 1. Navoji se izrađuju jednim od dva postupka: urezivanjem ili valjanjem (utiskivanjem) navoja. Urezivanje navoja je postupak pri kojemu se materijal odstranjuje iz rupe pomoću alata oblikovanih za izradu konačnog navoja u predviđenoj geometriji. Valjanje navoja provodi se bez odstranjivanja materijala, već njegovim utiskivanjem, odnosno njegovom preraspodjelom i plastičnim oblikovanjem unutar provrta rupe.



Slika 1. Vijci u navojnim rupama: prolazna navojna rupa (lijevo) i slijepa navojna rupa (desno) [5]

3 Minimalna duljina prihvata navoja

Najzanimljivija novost u novom FprEN [5], i najvažnija za ovu temu, jest definicija minimalne duljine prihvata navoja. Teorijska pozadina minimalne duljine prihvata navoja temelji se na radu Alexandera [6] koji je za sklopove vijaka i matica izloženih vlačnom opterećenju definirao model za proračun tri moguća načina otkazivanja: (i) lom vijka, (ii) kidanje vanjskih navoja (navoji na vijku) i (iii) kidanje unutarnjih navoja (navoji u matici, odnosno navoja urezanih po unutrašnjosti rupe). U standardnim vijčanim sklopovima potrebna je adekvatna duljina prihvata navoja kako bi se osiguralo otkazivanje preko loma vijka umjesto kidanja unutarnjeg ili

vanjskog navoja. Lom vijka duktilniji je i uočljiviji način otkazivanja u usporedbi s kidanjem navoja, a samim time i poželjniji. Omjer otpornosti dvaju materijala spojenih navoja definira način kidanja navoja uslijed vlačnog djelovanja na vijčani spoj: ako nosivost vanjskih navoja premašuje nosivost unutarnjih navoja, način otkazivanja biti će kidanje unutarnjih navoja (navoja u matici, odnosno u navojnoj rupi) i obrnuto.

U praksi duljina prihvata navoja općenito je jednaka visini standardne matice, čime je osiguran uvjet minimalne duljine prihvata navoja te *a priori* izbjegnuto otkazivanje navoja. Vijčani sklopovi proizvedeni u skladu s normama ISO 898-1 [7] i ISO 898-2 [8] ne bi trebali otkazati kidanjem navoja, tj. takav vijčani sklop ima punu nosivost i otkazuje preko tijela vijka. U slučaju BTH, duljina prihvata navoja jednaka je dubini rupe s urezanim navojima. Štoviše, materijal navojne rupe identičan je materijalu okolne čelične ploče, za razliku od unutarnjih navoja urezanih u maticu koja je izrađena od čelika visoke čvrstoće. Stoga je definicija minimalne duljine prihvata navoja najvažniji parametar za standardizaciju BTH.

Minimalna duljina prihvata navoja razmatrana je u normi VDI 2230 [9], s danim smjernicama za proračun otpornosti navoja. Rodier [10] je izveo izraze za minimalnu duljinu prihvata navoja uzimajući u obzir mogućnost otkazivanja unutar-njeg i vanjskog navoja, pri čemu ni kidanje vanjskih ni unutarnjih navoja ne smije biti mjerodavni način otkazivanja:

$$\min \{F_{bs,Rd}; F_{ns,Rd}\} \geq F_{t,Rd} \quad (1)$$

gdje je $F_{bs,Rd}$ otpornost na kidanje vanjskih (vijčanih) navoja, $F_{ns,Rd}$ otpornost na kidanje unutarnjih navoja (navojna rupa) i $F_{t,Rd}$ vlačna otpornost vijka. Na temelju navedenog uvjeta, Rodier [10] je predložio izraz za minimalnu duljinu prihvata navoja L_t za prolaznu navojnu rupu:

$$L_t \geq \max \{1,0 \cdot d; 0,45 \cdot d \cdot (2/3 + f_{ub}/f_u)\} \quad (2)$$

gdje je d nominalni promjer navoja vijka, f_{ub} vlačna čvrstoća vijka i f_u vlačna čvrstoća čelika navojne rupe.

Minimalne duljine prihvata navoja prema FprEN 1993-1-8 [5] definirane su izravno prema klasi čelika, čime je omogućena jednostavna primjena u inženjerskoj praksi, a prikazane su u Tablici 1. Vrijednosti dane u Tablici 1 slične su rezultatima dobivenim iz izraza (2), ali konzervativnije. Posebno je uočljivo da su sve klase čelika visoke čvrstoće iznad S460 objedinjene u jedinstven zahtjev prema klasi vijka, čime se onemogućuje puno iskorištenje mehaničkih svojstava HSS čelika.

Tablica 1. Minimalne duljine prihvata navoja L_t/d prema FprEN 1993-1-8 [5]

Klasa vijaka	Lt /d za klasu čelika			
	S235	S275	S355	≥ S460
4.6	1,00	1,00	1,00	1,00
5.6	1,02	1,00	1,00	1,00
8.8	1,34	1,23	1,11	1,06
10.9	1,58	1,43	1,26	1,19

4 Pregled dosadašnjih istraživanja

Istraživanje BTH priključaka u kontekstu konstruktivnih čeličnih konstrukcija u novije je vrijeme pokrenuto eksperimentalnim ispitivanjima vlačno opterećenih T-komada spojenih pomoću BTH. Grupa autora [11-13] provela je niz eksperimentalnih i numeričkih analiza vlačno opterećenih T-komada spojenih pomoću BTH. Osim što su praktični za provođenje eksperimentalnih ispitivanja, T-komadi su već integralni dio norme Eurokod 3 [3] kao metoda za projektiranje vijčanih spojeva, a spomenuti autori su predložili dva dodatna načina otkazivanja vlačno opterećenih T-komada koja uključuju otkazivanje navoja. Fokus radova [11-13] bio je na T-komadima i načinima otkazivanja za koje su predloženi analitički izrazi, čime je prikazana mogućnost primjene BTH na vijčane spojeve, međutim, minimalna duljina prihvata navoja i praktična primjena vijaka u navojnim rupama nije obrađena.

Latour i Rizzano [14] razvili su numeričke modele i proveli parametarske analize s ciljem definiranja proračunskih pravila za BTH priključke u vlačnom i posmičnom smjeru, uključujući prijedlog izraza za minimalnu duljinu prihvata navoja. Kao rezultat analize, predložena su dva izraza: konzervativniji za projektantsku praksu i manje konzervativni koji daje rezultate slične Rodierovim [10].

Ptiček et al. [2] dali su detaljnu analizu i usporedbu dostupnih odredbi za minimalnu duljinu prihvata navoja, uključujući grafičku usporedbu prema FprEN 1993-1-8 [5], Rodieru [10] i VDI 2230 [9], te je istražena mogućnost praktične primjene BTH u priključcima nosača i cijevnih stupova s čeonim pločama. Pokazano je da zahtjeve za duljinu prihvata navoja dane u FprEN 1993-1-8 [5] zadovoljava samo 8% razmatranih kombinacija parametara, dok uvjete prema Rodieru [10] zadovoljava 11% kombinacija – i to isključivo stupovi s najvećim debljinama stijenki (12,5 i 16 mm) i vijcima najmanjeg promjera (M12 i M16). Objedinjavanjem svih razreda HSS čelika u jedinstven zahtjev prema FprEN [5] onemogućuje se iskorištenje punog potencijala mehaničkih svojstava čelika visoke čvrstoće.

U nastavku istraživanja, Ptiček et al. [15] proveli su analitičku i numeričku para-

metarsku analizu vlačno opterećenih T-komada spojenih pomoću BTH kako bi se jasnije istražila razlika između dostupnih zahtjeva za minimalnu duljinu prihvata navoja. Za numeričku analizu odabrane su konfiguracije T-komada koje ispunjavaju uvjete minimalne duljine prihvata navoja sukladno Rodieru [10], a istovremeno ne ispunjavaju strože zahtjeve FprEN 1993-1-8 [5]. Sve konfiguracije T-komada otkazale su lomom vijka. Pokazalo se da analitičke proračunske vrijednosti podcjenjuju krajnju otpornost u svim razmatranim slučajevima, uključujući i HSS čelike, čime je ukazano na postojanje određenih rezervi otpornosti u razmotrenim konfiguracijama, a samim time i u odredbama FprEN 1993-1-8 [5].

5 Zaključak

U radu su predstavljeni osnovni principi primjene priključaka s vijcima u navojnim rupama, pregled dostupnih odredbi za minimalnu duljinu prihvata navoja te kronološki pregled dosadašnjih istraživanja s naglaskom na ograničenja koja proizlaze iz odredbi FprEN 1993-1-8 [5] za primjenu čelika visoke čvrstoće.

Na temelju predstavljene literature može se jasno utvrditi da još uvijek postoji manjak spoznaja o ponašanju spojeva s vijcima u navojnim rupama. Odredbe za minimalnu duljinu prihvata navoja definirane u FprEN 1993-1-8 [5] procijenjene su kao prestroge, što rezultira značajnim smanjenjem mogućnosti praktične primjene BTH. Osim toga, industrija proizvodnje čelika visoke čvrstoće značajno napreduje po pitanju tehnologije i tehničkih karakteristika, a cijevni profili od HSS čelika kao takvi idealni su za primjenu BTH. Međutim, odredbe FprEN 1993-1-8 [5] onemogućuju potpuno iskorištenje prednosti HSS čelika prilikom primjene BTH.

Navedenu je problematiku potrebno detaljnije istražiti i potvrditi provedbom laboratorijskih ispitivanja vlačno opterećenih T-komada spojenih vijcima u navojnim rupama izrađenim u čeličnim limovima i cijevnim profilima standardne i visoke čvrstoće. Dobiveni rezultati, uključujući i sveobuhvatnu parametarsku numeričku analizu, omogućit će probabilističko vrednovanje smjernica za proračun spojeva s vijcima u navojnim rupama danih u FprEN 1993-1-8 [5]. Na osnovi provedenog istraživanja, bit će moguće predložiti probabilistički utemeljena pravila za proračun spojeva s vijcima u navojnim rupama s obzirom na uvjete minimalne duljine prihvata navoja, koja će omogućiti primjenu čelika visokih čvrstoća.

Literatura

- [1] Y. Kurobane, J. Packer, J. Wardenier i N. Yeomans, Design Guide for Structural Hollow Section Column Connections, CIDECT Design Guide 9, 2004.

- [2] M. Ptiček, D. Skejić, M. Veljković and G. Rizzano: Structural steel joints with bolts in threaded holes, *Technical Gazette*, vol. 29, no. 4, pp. 1382-1393, 2022.
- [3] European Committee for Standardization (ECS): EN1993-1-8. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints, 2005.
- [4] A. Javora and D. Skejić: Resistance assessment of beam-to-column joints with different blind bolt systems, *Technical Gazette*, vol. 24, no. 4, pp. 1103-1112, 2017.
- [5] European Committee for Standardization (ECS): FprEN 1993-1-8. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-8: Joints, 2023.
- [6] E. M. Alexander: Analysis and Design of Threaded Assemblies, SAE Technical Paper 770420, 1977.
- [7] ISO 898-1:2013, Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel — Part 1: Bolts, screws and studs with specified property classes — Coarse thread and fine pitch thread, ISO, 2013.
- [8] ISO 898-2:2012, Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel — Part 2: Nuts with specified property classes — Coarse thread and fine pitch thread, ISO, 2012.
- [9] VDI 2230 Part 1, Systematic calculation of highly stressed bolted joints – Joints with one cylindrical bolt, Verein Deutscher Ingenieure, 2015.
- [10] A. Rodier: Résistance d'un taraudage à l'arrachement, *Revue Construction Métallique*, br. 4, 2016.
- [11] X. Zhu, P. Wang, M. Liu, W. Tuoya i S. Hu: Behaviors of one-side bolted T-stub through thread holes under tension strengthened with backing plate, *Journal of Constructional Steel Research*, svez. 134, p. 53–65, 2017.
- [12] M. Liu, X. Zhu, P. Wang, W. Tuoya i S. Hu: Tension strength and design method for thread-fixed one-side bolted T-stub, *Engineering Structures*, svez. 150, p. 918–933, 2017.
- [13] T. Wulan, P. Wang, Y. Li, Y. You i F. Tang: Numerical investigation on strength and failure modes of thread-fixed one-side bolted T-stubs under tension, *Engineering Structures*, svez. 169, p. 15–36, 2018.
- [14] M. Latour and G. Rizzano: Numerical study on the resistance of thread-fixed one-side bolts: Tensile and bearing strength, *Structures*, vol. 32, pp. 958-972, 2021.
- [15] M. Ptiček, D. Skejić, M. Latour i G. Rizzano: Numerical Study on Behaviour of T-stubs with Bolts in Tapped Holes, *ce/papers*, svez. 6, br. 3-4, pp. 1244-1249, 2023.

Dugotrajna svojstva niskougličnog betona s dodatkom pepela drvene biomase

Marija Mendeš¹, Nina Štirmer²

¹Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, marija.mendes@grad.unizg.hr

²Sveučilišta u Zagrebu Građevinski fakultet, nina.stirmer@grad.unizg.hr

Sažetak

Smanjenje emisija CO₂ u građevinskom sektoru zahtijeva razvoj niskougličnih betona i veću primjenu sekundarnih sirovina. Rad istražuje dugotrajno ponašanje betona s dodatkom pepela drvene biomase (PDB), nusproizvoda energetske postrojenja na biomasu. Poseban naglasak stavljen je na mehanička svojstva, trajnost i okolišne učinke. Preliminarni rezultati ukazuju na potencijal primjene PDB-a u cementnim kompozitima te potrebu daljnjeg sustavnog istraživanja dugotrajnih svojstava i njihova utjecaja na projektiranje armiranobetonskih konstrukcija.

Ključne riječi: pepeo drvene biomase, niskouglični beton, trajnost, kružno gospodarstvo, dugotrajna svojstva

Long-term properties of low-carbon concrete with wood biomass ash addition

Abstract

Reducing CO₂ emissions in the construction sector requires the development of low-carbon concretes and increased use of secondary raw materials. This paper examines the long-term behaviour of concrete containing wood biomass ash (WBA), a by-product of biomass energy plants. Particular emphasis is given to mechanical properties, durability, and environmental impacts. Preliminary results indicate the potential for using WBA in cement composites and highlight the need for further systematic research on long-term properties and their influence on the design of reinforced concrete structures.

Key words: wood biomass ash, low-carbon concrete, durability, circular economy, long-term properties

1 Uvod

Građevinski sektor značajno utječe na okoliš, pri čemu proizvodnja cementa predstavlja jedan od najvećih izvora emisija ugljikova dioksida (CO_2) u industriji. Procjenjuje se da proizvodnja cementa doprinosi približno 7 – 8 % globalnih emisija CO_2 , uglavnom zbog visoke energetske potrošnje i procesa kalcinacije vapnenca tijekom proizvodnje klinkera [1]. To čini dekarbonizaciju cementne industrije jednim od najizazovnijih pothvata u industrijskoj tranziciji prema održivosti [2].

U tom kontekstu intenzivno se razvijaju koncepti niskougljičnih betona, koji uključuju smanjenje udjela klinkera u cementu, primjenu alternativnih veziva te uvođenje sekundarnih materijala u betonske mješavine [3]. Jedan od takvih materijala je pepeo drvene biomase (PDB) – nusproizvod nastao izgaranjem drvene biomase u energetske postrojenjima. S obzirom na rastuću uporabu biomase kao obnovljivog izvora energije, količine proizvedenog PDB-a kontinuirano rastu, postavljajući pitanje njegove ekološki održive uporabe [4]. Primjena PDB-a u cementnim kompozitima može istovremeno doprinijeti smanjenju količine otpada od termičke obrade biomase i smanjenju potrošnje primarnih sirovina u proizvodnji betona, što je u skladu s načelima kružne ekonomije i održivog razvoja [5].

Dosadašnja istraživanja pokazuju da se PDB može upotrebljavati kao mineralni dodatak ili djelomična zamjena cementa i agregata u betonu, s potencijalnim pozitivnim učincima na mehanička svojstva i trajnost pri umjerenim razinama zamjene [4]. Međutim, zbog velike varijabilnosti kemijskog sastava i fizikalnih svojstava PDBa, njegova primjena u betonu još nije potpuno istražena niti normirana [3, 6]. Nadalje, postoji ograničen broj podataka o dugotrajnom ponašanju takvih kompozita, što predstavlja barijeru za njihovu primjenu u konstrukcijskim elementima [4, 7].

2 Primjena pepela drvene biomase u betonu

PDB nastaje u različitim fazama procesa izgaranja i može se klasificirati kao leteći pepeo, pepeo s dna peći ili miješani pepeo [8]. Njegova kemijska i mineralna svojstva ovise o vrsti biomase, uvjetima izgaranja te načinu prikupljanja i skladištenja pepela [4]. U usporedbi s letećim pepelom iz termoelektrana na ugljen, PDB često pokazuje veću varijabilnost sastava, što može utjecati na njegova reaktivna i vezivna svojstva u cementnim sustavima [9].

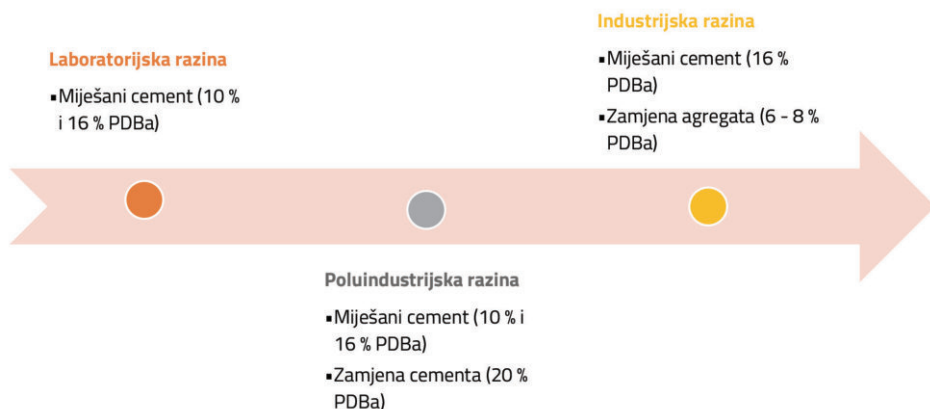
U literaturi se PDB najčešće istražuje kao djelomična zamjena cementa, agregata ili kao dodatak u mortovima i betonu [10, 11, 12]. Rezultati pokazuju da manji udjeli pepela biomase ($\approx 10 - 20 \%$) mogu imati ograničen ili čak pozitivan učinak na tlačnu čvrstoću betona, dok veći udjeli obično utječu na smanjenje mehaničkih svojstava [4]. Osim toga, PDB utječe i na svojstva svježeg betona, osobito na

konzistenciju, gdje je često potreban dodatak superplastifikatora kako bi se održala obradljivost i homogenost smjese [4].

Iako su brojna istraživanja usmjerena na tlačnu čvrstoću u ranim starostima, znatno je manje dostupnih podataka o dugotrajnom razvoju mehaničkih svojstava, deformacijama i trajnosti betona s dodatkom PDBa. Upravo su takvi podaci ključni za procjenu mogućnosti primjene ovih materijala u konstrukcijskim elementima i za razvoj budućih normi i smjernica [4, 7].

3 Preliminarna eksperimentalna istraživanja

U sklopu projekta AshCycle provedena su istraživanja na laboratorijskoj, poluindustrijskoj i industrijskoj razini (slika 1.) [13]. Ispitivanja su uključivala zamjenu dijela cementa PDB-om, primjenu miješanih cementa te djelomičnu zamjenu agregata u različitim betonskim sastavima. Cilj istraživanja bio je procijeniti učinak ovih materijala na mehanička svojstva, trajnost i primjenjivost u predgotovljenim i nosivim elementima.



Slika 1. Shematski prikaz istraživačkih aktivnosti prema razinama ispitivanja

3.1 Miješani cement

Laboratorijska istraživanja miješanih cementa s udjelom PDB-a od 10 % i 16 % pokazala su veću tlačnu čvrstoću nakon 28 dana u usporedbi s referentnim cementom, uz blago povećanje gustoće betona. Poluindustrijska i industrijska ispitivanja potvrdila su da odabrana mješavina s približno 16 % PDB-a predstavlja optimalan kompromis između mehaničkih svojstava i dostupnosti sekundarnog materijala, osiguravajući stabilna svojstva i tijekom industrijske proizvodnje.

Industrijska primjena uključivala je proizvodnju predgotovljenih opločnika (slika 2.) i klupa (slika 3.) gdje je miješani cement sa 16 % PDB-a zadovoljavao kriterije

mehaničkih svojstava i trajnosti, uključujući otpornost na smrzavanje, minimalno upijanje vode i veliku otpornost na prodiranje vode.



Slika 2. Predgotovljeni opločnici (osnovni sloj – beton s miješanim cementom sa 16 % PDB-a)



Slika 3. Predgotovljena betonska klupa proizvedena s miješanim cementom sa 16 % PDB-a

3.2 Zamjena cementa

Poluindustrijska ispitivanja u kojima je 20 % portlandskog cementa zamijenjeno s PDB-om pokazala su značajan utjecaj na svojstva svježeg betona, dok su mehanička svojstva očvrslulog betona bila zadovoljavajuća i usporediva s referentnom mješavinom. Ispitivanja trajnosti pokazala su zadovoljavajuće rezultate za primjenu u predgotovljenim nekonstrukcijskim elementima, s povoljnim svojstvima upijanja vode i otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje.

3.3 Zamjena agregata

U okviru istraživanja, PDB je korišten kao djelomična zamjena prirodnog pijeska i agregata u mješavinama za lijevane ploče i lijevani beton (slika 4. i slika 5.). Primjena ovih nusproizvoda omogućuje smanjenje ovisnosti o prirodnim resursima i doprinosi kružnoj ekonomiji.

Ispitivanja su pokazala da udio pepela od 6 - 8 % u odnosu na referentnu mješavinu može značajno utjecati na svojstva betona. Optimalna izvedba postignuta je pri manjim udjelima pepela. Također je potvrđeno da su svojstva mješavina vrlo osjetljiva na promjenu sastava mješavine i uporabu dodataka, te da udio PDB-a sam po sebi nije pouzdan parametar za procjenu izvedbe.



Slika 4. Betonske žardinjere sa 6 % PDB-a zamjene agregata (dio „mini” pilot-projekta u Osnovnoj školi Mušaluk)



Slika 5. Betonska klupa sa 6 % PDB-a zamjene agregata (pilot-projekt u Klinča Selima)

4 Rasprava

Preliminarni rezultati ukazuju na potencijal primjene PDB-a u proizvodnji nisko-ugljičnih betona. Međutim, dostupni podaci uglavnom se odnose na kratkoročna svojstva materijala, dok su dugotrajni procesi poput razvoja skupljanja, promjena modula elastičnosti ili utjecaja okolišnih uvjeta nedovoljno istraženi.

S obzirom na veliku varijabilnost sastava PDB-a, očekuje se da će vrsta pepela, udio zamjene i uvjeti njege imati značajan utjecaj na razvoj mikrostrukture i dugotrajna svojstva betona. Stoga je potrebno provesti sustavna dugotrajna ispitivanja koja će omogućiti bolje razumijevanje odnosa između sastava materijala, mikrostrukture i mehaničkih svojstava.

Rezultati ovakvih istraživanja mogli bi pružiti znanstvenu osnovu za širu primjenu PDB-a u betonu te pridonijeti razvoju budućih smjernica i norma za upotrebu takvih betona u konstrukcijskim elementima.

5 Zaključak

Rezultati dosadašnjih istraživanja ukazuju na potencijal primjene PDB-a kao sekundarnog materijala u cementnim kompozitima te na mogućnost razvoja niskougljičnih betona s prihvatljivim mehaničkim svojstvima. Preliminarna eksperimentalna ispitivanja pokazuju da odgovarajući udjeli PDB-a mogu osigurati zadovoljavajuće performanse betona, uz određene promjene u svojstvima svježeg i očvrsnulog stanja. Međutim, dostupni podaci o dugotrajnom ponašanju takvih kompozita i dalje su ograničeni, osobito u pogledu deformacijskih svojstava i trajnosti u različitim uvjetima okoliša.

Buduća istraživanja trebala bi biti usmjerena na sustavno ispitivanje dugotrajnih mehaničkih svojstava i svojstava trajnosti betona s dodatkom PDB-a te na analizu utjecaja sastava pepela, udjela zamjene i uvjeta njege na razvoj mikrostrukture i performansi materijala. Dobiveni rezultati trebali bi doprinijeti boljem razumijevanju ponašanja ovih materijala te predstavljati znanstvenu osnovu za njihovu širu primjenu u građevinskoj praksi i buduću razvoj normativnih smjernica.

Zahvala

Ispitivanja predstavljena u ovom radu provedena su u okviru znanstvenog projekta *AshCycle – Integration of Underutilized Ashes into Material Cycles by Industry-Urban Symbiosis*, 101058162, HORIZON-CL4-2021-TWIN-TRANSITION-01. Rad doktorandice podržan je kroz „Program razvoja karijera mladih istraživača – izobrazba novih doktora znanosti (NPOO-DOK-2023-10)”, koji financira Hrvatska zaklada za znanost (HRZZ).

Literatura

- [1] Ige, O. E., Kabeya, M.: Decarbonizing the Cement Industry: Technological, Economic, and Policy Barriers to CO₂ Mitigation Adoption, *Clean Technologies*, 7, 2025.
- [2] Martínez-García, R., et al.: The Present State of the Use of Waste Wood Ash as an Eco-Efficient Construction Material: A Review, *Materials*, 15, 2022.
- [3] Marandi, N., Shirzad, S.: Sustainable cement and concrete technologies: a review of materials and processes for carbon reduction, *Discover Civil Engineering*, 2025.
- [4] Teker Ercan, E. E., Andreas, L., Cwirzen, A., Habermehl-Cwirzen, K.: Wood Ash as Sustainable Alternative Raw Material for the Production of Concrete - A Review, *Materials*, 16, 2023.
- [5] Bragança, L., Cvetkovska, M., Askar, R., Ungureanu, V.: Creating a Roadmap Towards Circularity in the Built Environment, *Springer Tracts in Civil Engineering*, 2023.
- [6] Liang, X., Li, Z., Dong, H., Ye, G.: A review on the characteristics of wood biomass fly ash and their influences on the valorization in cementitious materials, *Journal of Building Engineering*, 2024.
- [7] Olatoyan, O. J., Kareem, M. A., Adebajo, A. U., Olawale, S. O. A., Alao, K. T.: Potential use of biomass ash as a sustainable alternative for fly ash in concrete production: A review, *Hybrid Advances*, 2023.
- [8] Štirmer, N., Carević, I.: Utilization of Wood Biomass Ash in Concrete Industry, *IntechOpen*, 2022.
- [9] Al-Kharabsheh, B. N., Arbili, M. M., Majdi, A., Ahmad, J., Deifalla, A. F., Hakamy, A.: A Review on Strength and Durability Properties of Wooden Ash Based Concrete, *Materials*, 15, 2022.
- [10] Pandolfi Balbi, E., et al.: Wood biomass ash, municipal solid waste ash, and recycled concrete from construction demolition waste as supplementary cementitious materials in fine graded granular mixtures, *Construction and Building Materials*, 498, 2025.
- [11] Carević, I., Bajto, J. Š., Grubor, M., Štirmer, N.: Wood biomass ash as a clinker substitute in advancing next-generation blended cement: Croatian case study, *Scientific Reports*, 2026.
- [12] Jensen, A. H., Ottosen, L. M., Edvardsen, C.: Wood bottom ash as sand replacement in concrete: Mechanical properties and prediction of durability, *Construction and Building Materials*, 512, 2026.
- [13] AshCycle - Integration of Underutilized Ashes into Material Cycles, www.ashcycle.eu/en

Analiza korištenih procedura rješavanja sporova u projektima gradnje

Ines Pean¹, Mladen Vukomanović²

¹Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, ipean@grad.hr

²Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, mladen.vukomanovic@grad.unizg.hr

Sažetak

Posljednji godišnji izvještaji pokazuju kako je ukupna vrijednost sporova na globalnoj razini iznosila 95 mlrd. US\$. Pregledom literature analizirani su trendovi u rješavanju sporova, pri čemu u svijetu dominiraju alternativne procedure. Istraživanje je pokazalo postojanje potrebe za razvojem modela odlučivanja kao potpore pri odabiru optimalne procedure rješavanja sporova. Primjena razvijenih modela doprinijela bi donošenju objektivnijih odluka i ublažavanju negativnih posljedica sporova na realizaciju projekata.

Ključne riječi: sporovi u gradnji, rješavanje sporova, institucionalno rješavanje sporova, alternativno rješavanje sporova, modeli odlučivanja

Review of dispute resolution procedures in construction projects

Abstract

The most recent annual reports indicate that the total value of disputes on a global level amounted to USD 95 billion. A review of the literature has analysed trends in dispute resolution, where alternative dispute resolution methods dominate worldwide. The research has identified a need for the development of decision-making models to support the selection of the optimal dispute resolution procedure. The application of such models would contribute to more objective decision-making and to mitigating the negative impacts of disputes on project implementation.

Key words: construction disputes, dispute resolution, institutional dispute resolution, alternative dispute resolution (ADR), decision – making models

1 Uvod

Građevinski projekti u pravilu su dugotrajni, složeni i financijski zahtjevni, kako u tehničkom tako i u pravno ekonomskom smislu. Zbog velikog broja sudionika, značajnih financijskih ulaganja i složenih ugovornih odnosa, tijekom realizacije projekata često dolazi do nesuglasica među ugovornim stranama [1]. Takve nesuglasice mogu prerasti u sporove koji rezultiraju kašnjenjima u izvođenju radova, povećanjem troškova, narušavanjem poslovnih odnosa a u krajnjim slučajevima i raskidom ugovora. Navedeni ishodi prvenstveno su povezani s fazom gradnje. Prema godišnjem izvještaju za 2025. g. jedne od međunarodnih konzultantskih tvrtki, ukupna vrijednost sporova u projektima gradnje na globalnoj razini iznosila je 95 mlrd. US\$ [2]. Uzroci nastanka sporova u građevinskim projektima kontinuirano se stručno analiziraju. Postoji tek manji broj stručnih članka koji istražuju područje odabira optimalne procedure rješavanja sporova kroz razvijeni model odlučivanja. Utvrđeno je kako razvoj modela odlučivanja nije značajnije i recentnije obrađen te će slijedom navedenog istraživanje biti usmjereno na to područje. Razvijeni model može pomoći stručnjacima u donošenju utemeljenog odabira o proceduri rješavanja sporova kroz sustavno razmatranje više čimbenika koji utječu na izbor odgovarajuće procedure [3]. Pravodoban odabir optimalne procedure izvjesno bi doprinio uspješnijem i učinkovitijem rješavanju sporova kada oni nastanu, uz smanjenje negativnih financijskih i vremenskih posljedica za projekt. U nastavku je dan pregled analiziranih tema iz područja istraživanja. U Poglavlju 2 je pregled procedura rješavanja sporova u domaćoj građevinskoj praksi. U Poglavlju 3 dan je pregled procedura rješavanja sporova u svijetu. Dosadašnja istraživanja o razvoju modela za odabir optimalne procedure rješavanja sporova s daljnjim preporuka za razvoj je u Poglavlju 4. Cilj istraživanja je analizirati postojeće spoznaje i modele odlučivanja te na temelju dobivenih saznanja definirati smjernice za daljnji razvoj modela za odabir optimalne procedure rješavanja sporova u javnim infrastrukturnim projektima. Istraživanje će nastojati odgovoriti i na sljedeća istraživačka pitanja. Koje se procedure rješavanja sporova u građevinskim projektima koriste u Republici Hrvatskoj (u daljnjem tekstu RH)? Koje procedure rješavanja sporova postoje u svijetu? Koji su kriteriji sudionicima spora ključni kod rješavanja spora? Koji su nedostatci, ograničenja do sada postavljenih modela?

2 Pregled procedura rješavanja sporova u građevinskim projektima u RH

Ugovori iz područja građenja u RH najčešće se uređuju sukladno odredbama Zakona o obveznim odnosima (u daljnjem tekstu ZOO) ili primjenom standardiziranih FIDIC modela ugovora. Sporovi koji proizlaze iz ugovora temeljenih na ZOO

uglavnom se rješavaju institucionalno pred redovnim sudovima [4], dok FIDIC modeli ugovora kod rješavanja sporova primjenjuju alternativne procedure rješavanja sporova poput Vijeća za rješavanje sporova (u daljnjem tekstu VRS) i arbitraže [5]. Medijacija je također alternativna procedura rješavanja sporova koja može biti institucionalna ili izvaninstitucionalna [6].

2.1 Sudsko rješavanje sporova

U slučaju nastanka spora u građevinskim projektima sporovi se rješavaju pred trgovačkim sudovima koji predstavljaju prvostupanjski sud [7]. U slučaju da jedna od stranaka u sporu nije zadovoljna odlukom prvostupanjskog suda, ona ima pravo podnijeti žalbu. O žalbi odlučuje drugostupanjski sud, odnosno Visoki trgovački sud RH [7]. Visoki trgovački sud može odbiti žalbu i potvrditi prvostupanjsku odluku, preinačiti odluku prvostupanjskog suda ili ukinuti odluku te predmet vratiti na ponovno odlučivanje prvostupanjskom sudu [7]. U slučaju kada Visoki trgovački sud odbije žalbu ili preinači prvostupanjsku odluku takva odluka postaje pravomoćna i ovršna [7]. Iz navedenog proizlazi kako se sudsko rješavanje građevinskih sporova odvija kroz više instanci, pri čemu trajanje postupka nije unaprijed određeno, već ovisi o opterećenosti sudova brojem predmeta, složenosti konkretnog spora te provođenju dokaznog postupka, koji u građevinskim sporovima često uključuje tehnička i financijska vještačenja. Unatoč neizvjesnom trajanju, sudsko rješavanje sporova i dalje predstavlja najprepoznatljiviji način rješavanja sporova, ponajprije zbog percepcije veće pravne sigurnosti, institucionalne zaštite i relativno nižih troškova postupka.

2.2 Vijeće za rješavanje sporova - VRS

VRS predstavlja prvi korak u postupku rješavanja sporova prema FIDIC Uvjetima Ugovora iz 1999.g. FIDIC Uvjeti Ugovora, drugo izdanje iz 2017.g., predviđaju formiranje Vijeća za izbjegavanje i rješavanje sporova [5]. Ključna razlika između FIDIC izdanja 1999.g. i 2017.g. je u proširenju funkcije tijela za rješavanje sporova s isključivo reaktivnog pristupa na preventivni pristup upravljanju sporovima. U RH trenutačno postoji samo prijevod FIDIC Uvjeta ugovora iz 1999.g. tako da je kao alternativna procedura rješavanja spora prisutan samo VRS. Ključne značajke VRS odnose se na njegov operativni i vremenski učinkovit karakter. Operativna karakteristika VRS jest osiguravanje kontinuiteta izvođenja radova kroz privremeno obvezujuće odluke koje stranke moraju izvršavati do eventualnog preispitivanja u arbitražnom postupku kao sljedećem koraku. Vremenska učinkovitost predstavlja jednu od temeljnih procesnih karakteristika VRS. FIDIC pravila propisuju obvezu donošenja odluke VRS u roku od 84 dana od podnošenja zahtjeva za rješavanje spora, uz mogućnost dodatnog skraćivanja roka kroz Posebne uvjete

ugovora [5]. Takva unaprijed određena dinamika postupka osigurava pravovremeno rješavanje sporova i značajno odstupa od trajanja sudskih postupaka, koji nerijetko traju više godina. U RH je tijekom posljednjih godina institut VRS dodatno reguliran i institucionalno osnažen kroz djelovanje Hrvatske gospodarske komore (u daljnjem tekstu HGK) i Hrvatske udruge konzultanata.

2.3 Arbitraža

Arbitraža je najčešće ugovarani mehanizam za konačno rješavanje građevinskih sporova. Karakteristike arbitraže su stručnost arbitara, obzirom da se biraju osobe s iskustvom u građevinskoj i pravnoj praksi te fleksibilnost jer je strankama omogućeno da određuju pravila postupka, jezik i mjerodavno pravo [8]. Arbitraža je u pravilu brza procedura zbog jedinstvenog postupka koji rezultira odlukom koja je konačna i izvršna. Odluke imaju međunarodni legitimitet. Arbitraža se kao procedura koristi kod sporova koji imaju veću financijsku vrijednost. Takav zaključak su potvrdili i statistički podatci HKG kako je u posljednjih deset godina Stalno arbitražno sudište pri HGK riješilo približno 300 sporova, čija je ukupna vrijednost iznosila gotovo 400 milijuna eura, uz prosječnu vrijednost spora od oko 1,3 milijuna eura. [9].

2.4 Medijacija

Medijacija je dobrovoljan i fleksibilan postupak rješavanja sporova u kojem treća neutralna osoba (medijator) pomaže ugovornim stranama da postignu zajednički dogovor i tako izbjegnu sudski ili arbitražni postupak [6]. Glavne prednosti medijacije su u bržem i troškovno učinkovitijem postupku u odnosu na arbitražu i sudske sporove, očuvanju poslovnih odnosa kroz kompromisno rješavanje spora te fleksibilnosti zbog mogućnosti provođenja u bilo kojoj fazi spora, odnosno prije, tijekom ili paralelno s drugim postupcima poput arbitraže ili VRS [6].

3 Pregled procedura rješavanja sporova u građevinskim projektima u svijetu

U svjetskoj praksi procedure rješavanja sporova se kao i u RH dijele na institucionalne i alternativne. Institucionalna procedura je parničenje. Mnogi stručnjaci iz građevinske industrije, kao Construction Industry Institute, smatraju kako je parničenje posebno neprikladno za rješavanje građevinskih sporova [1]. Razlozi za navedeno su što budući poslovi mogu ovisiti o sadašnjim i prijašnjim poslovnim odnosima, osobito kada je riječ o privatnim investicijama. Drugi razlog je složenost tehničkih i financijskih pitanja povezanih s građevinskim sporovima koja najčešće nisu bliska pravnim stručnjacima angažiranim u parničnom postupku [1]. Sve do

kasnih 1980-ih postupak rješavanja sporova uključivao je pregovore i određeni oblik administrativnog žalbenog postupka, eventualno medijaciju, nakon čega bi slijedila arbitraža ili sudski postupak [10]. Glavni razlog razvoja alternativnih procedura rješavanja sporova bio je stvaranje postupka koji bi bio brži i jeftiniji od parničnja [11]. Iz razloga što većina alternativnih procedura rješavanja sporova omogućuje strankama da same odlučuju u postupku, odluke su obično zadovoljavajuće za stranke i lakše za provedbu. Kod alternativnih procedura rješavanja sporova u odnosu na parničnje, prisutno je više suradnje a manje suprotstavljanja stavova. Zbog navedenog alternativne procedure rješavanja sporova doprinose očuvanju poslovnih odnosa između stranaka, što se smatra jednom od ključnih prednosti, budući da stranke nakon postizanja sporazuma često nastavljaju surađivati na postojećim i budućim projektima [12]. Građevinska industrija prepoznala je potrebu i za razvojem mehanizama za izbjegavanje i sprječavanje sporova kojim bi se smanjila vjerojatnost razvoja početnih nesuglasica u sporove, prilagođenih za primjenu tijekom faze planiranja i pripreme projekta. Razvijene procedure su preventivne naravi. U Tablici 1. je pregled preventivnih i reaktivnih alternativnih procedura rješavanja sporova [1,11]

Tablica 1. Alternativne procedure rješavanja sporova

Preventivne alternativne procedure koje sprečavaju nastanak spora	Pohrana natječajne dokumentacije (eng. Escrow Bid Documents)
	Delegiranje ovlasti (eng. Delegation of Authority)
	Hijerarhija rješavanja sporova (eng. Dispute Resolution Ladder)
	Izvešća o geotehničkom projektiranju (eng. Geotechnical Design Summary Reports)
	Partnering
Reaktivne alternativne procedure kojima se rješavaju nastali sporovi	Početni donositelj odluke (eng. Initial Decision Maker/Single Dispute)
	Neutralni projektni stručnjak (eng. Standing or Project Neutral/On-Site Neutral)
	Rano neutralno vrednovanje (eng. Early Neutral Evaluation. ENE)
	Uprava Naručitelja (eng. Owner/Agency Review Bord)
	Odbori za rješavanje sporova (eng. Dispute Resolution Boards DRB)
	Adjudikacija (eng. Adjudication)
	Medijacija (eng. Mediation)
	Hibridni modeli (eng. Med-Arb, Med-Then-Arb i Arb-Med)
	Mini suđenje (eng. Minitrial)
	Skraćeni parnični postupak (emg. Summary Jury Trial)
	Odlučivanje stručnjaka (eng. Expert Determination)
	Direktno pregovaranje (eng. Party to Party Negotiation)
	Arbitraža (eng. Arbitration)

4 Diskusija: smjernice za daljnji razvoj modela odlučivanja za izbor optimalne procedure rješavanja sporova

U Poglavlju 3 navedene su procedure rješavanja sporova koje se primjenjuju u međunarodnoj praksi. Svaka od navedenih procedura ima specifična proceduralna obilježja, prednosti i nedostatke te različitu razinu prikladnosti u odnosu na pravno okruženje u kojem se projekt realizira, karakteristike projekta te prioritete ugovornih strana u postupku rješavanja sporova. Odabir metode rješavanja sporova koja odgovara specifičnim potrebama pojedinog projekta nije jednostavan zadatak. Pristup građevinske industrije pri odabiru metode rješavanja sporova često je predmet kritika zbog prekomjernog oslanjanja na subjektivnu procjenu umjesto na objektivan i sustavan pristup [13]. Brojna istraživanja su naglasila potrebu za sustavnim odabirom metode rješavanja sporova [14]. Jedan od prvih razvijenih modela odlučivanja o izboru procedure rješavanja sporova jest MAUT model (engl. Multi-Attribute Utility Technique), razvijen primjenom metode više-kriterijskog odlučivanja u kojoj se pojedinim kriterijima dodjeljuju relativne težine i vrijednosti s ciljem evaluacije i optimalnog odabira među više mogućih opcija [15]. MAUT model je razvijen kao pomoć voditeljima projekta za lokalne projekte srednje veličine [13]. Kako bi MAUT model mogao biti primijenjen za međunarodne projekte isti je trebalo nadograditi. Metodologija nadogradnje modela uključivala je pregled literature radi dobivanja popisa koji su ključni kriteriji za odabir procedure i koje su najčešće korištene procedure rješavanja sporova. Dobiveni podatci su potvrđeni intervjuima sa 41 stručnjakom iz područja građevinskih sporova, te je dobivena lista od 15 ključnih kriterija za odabir procedure rješavanja spora. Kako bi se potvrdilo koji ključni kriteriji su primjenjivi za međunarodne projekte, utvrđenu listu su dodatno revidirala 4 arbitra Međunarodnog arbitražnog centra u Hong Kong. U Tablici 2. je konačan težinski poredan popis 9 ključnih kriterija za odabir procedure rješavanja spora nakon što su im stručnjaci iz područja građevinske industrije dodijelili težinske pondere [13].

Tablica 2. Ključni kriteriji za odabir procedure

1.	Provedivost odluka
2.	Troškovi postupka
3.	Povjerljivost
4.	Trajanje postupka
5.	Utjecaj treće strane na proces odlučivanja
6.	Očuvanje poslovnih odnosa
7.	Ublažavanje neravnoteže zbog različitih pozicija moći
8.	Smanjenje negativnih učinaka uzrokovanih različitim pravnim sustavima
9.	Smanjenje negativnih učinaka uzrokovanih kulturološkim razlikama

Korištenjem specijaliziranog softvera EXPERT CHOICE provedena je metoda analitičkog hijerarhijskog procesa (u daljnjem tekstu AHP) s podacima o ključnim kriterijima i najčešće korištenim procedurama. U Tablici 3. dan pregled rangiranih procedura rješavanja sporova u međunarodnim projektima nakon provedene AHP [13].

Tablica 3. Rangirane procedure rješavanja sporova kod međunarodnih projekata

1.	Medijacija
2.	Stručno odlučivanje
3.	Arbitraža
4.	Mini suđenje
5.	Adjudikacija
6.	VRS
7.	Parničenje

2011.g. provedeno je istraživanje koje je razvilo analitički okvir odlučivanja o odabiru procedure rješavanja sporova za međunarodne građevinske projekte utemeljen na čimbenicima rizika. Analitički okvir razvijen primjenom matrice rizika analizirao je pojedine procedure rješavanja sporova na temelju njihovih karakterističnih obilježja, s ciljem procjene prikladnosti njihove primjene u odnosu na identificirane projektne rizike. Rizici u građevinskim projektima se prema izvoru nastanka dijele u dvije skupine. Rizici specifični za projekt koji predstavljaju neizvjesnosti koje postoje unutar samog projekta, te rizici koji proizlaze iz makrookruženja unutar kojeg se projekt realizira [16, 17]. Ulazni podatci za matricu rizika dobiveni su intervjuiranjem 40 stručnjaka iz industrije koji se bave rješavanjem sporova. Na temelju provedenih istraživanja koja su prethodno prezentirana, jasno je kako je građevinska industrija prepoznala potrebu za razvojem modela odlučivanja koji bi služili kao potpora dionicima u donošenju objektivnih odluka o odabiru optimalne procedure rješavanja sporova. U nastavku je dana analiza prethodno prezentiranih modela sa smjernicama za daljnji razvoj. Nadograđeni MAUT model je baziran na preferencijama dionika sporova dok je matrica rizika bazirana na rizicima projekta. MAUT model je metodološki konkretniji ali ima ograničenje u dostupnosti i jednostavnosti korištenja specijaliziranog softvera za provedbu AHP. Dodatno ograničenje modela je u broju ispitanika, veći broj ispitanika bi izvjesno dao raznolikije rezultate te konačno model nije validiran na stvarnim ishodima. Matrica rizika bazirana je na subjektivnim procjenama opet ograničenog broja ispitanika i daje binarni prikaz prikladnosti procedure u odnosu na identificirani rizik bez mogućnosti rangiranja procedura i mogućnosti procjene prikladnosti procedure ukoliko je prisutno više istovremenih rizika. Identificirani su samo rizici iz perspektive Izvođača te je time matrica pogodan alat samo za Izvođače. Matrica rizika nije validirana na stvarnim ishodima.

Postojeći modeli imaju nedostatke koje je kod razvoja sljedećih modela potrebno svladati. (1) jedan model bira proceduru po kriteriju preferencije stranaka u sporu dok drugi model ima kao kriterij rizike projekta; (2) modeli ne uzimaju u obzir specifičnosti različitih tipova projekata; (3) modeli nisu validirani na stvarnim podacima o financijskoj vrijednosti i trajanju sporova. Na temelju provedene analize do sada razvijenih modela u nastavku se navedene smjernice za daljnji razvoj modela odlučivanja prilagođen javnim infrastrukturnim projektima. (1) potrebno je integrirati rizike i preferencije u jedinstveni multikriterijski model; (2) osigurati rangirani prikaz prikladnosti procedura u odnosu na više istovremenih rizika; (3) model prilagoditi za javne infrastrukturne projekte; (4) model validirati na stvarnim podacima o financijskoj vrijednosti i trajanju sporova; (5) proširiti bazu stručnjaka; (6) omogućiti otvoreni pristup specijaliziranim softverima koji moraju biti jednostavni za korištenje.

5 Zaključak

Istraživanje je provedeno kroz analizu dostupne literature iz područja sporova s naglaskom na procedure rješavanja sporova i razvijene modele odlučivanja. U RH je i nadalje najznačajnije zastupljen institucionalni način rješavanja sporova dok se u međunarodnoj praksi dominantno koriste alternativne procedure rješavanja sporova. Iz dostupne literature se zaključuje kako do sada nije ostvaren značajniji napredak u razvoju modela odlučivanja i njihova primjena u praksi. Na temelju provede analize nedvojbeno je utvrđena potreba za daljnjim razvojem modela. Podaci iz dosadašnjih istraživanja ukazuju kako je za kvalitetu razvoja budućega modela prilagođenog za javne infrastrukturne projekte osim širenja baze ispitanika, potrebno omogućiti odlučivanje po više kriterija, razvojem multikriterijskog sustava koji spaja projektne rizike i preferencije dionika spora te nudi rangirani prikaz prikladnosti pojedine procedure. Također, model je nužno prilagoditi specifičnostima javnih infrastrukturnih projekata te ga validirati na stvarnim podacima i učiniti dostupnim kroz jednostavan računalni softver. Javne investicije posebno su osjetljive na sporove i njihove ishode. Primjena razvijenog modela bi mogla doprinijeti ublažavanju negativnih posljedica koje sporovi imaju na realizaciju građevinskih projekata.

Literatura

- [1] Harmon, K.M.J.; Resolution Of Construction Disputes: A Review of Current Methodologies, LEADERSHIP AND MANAGEMENT IN ENGINEERING 3 (2003) 4, pp. 187-201.
- [2] An Analysis of Claims and Dispute Causation – from Insight to Foresight CRUX 8th Annual Report, www.hka.com/crux-insight/

- [3] Chan, E.H.W., Suen H.C.H., Chan, C.K.L.: MAUT-Based Dispute Resolution Selection Model Prototype for International Construction Projects, JOURNAL OF CONSTRUCTION ENGINEERING AND MANAGEMENT 132 (2006) 5, pp. 444-451.
- [4] Zakon o obveznim odnosima (2005), Narodne novine, br. 35/05, 41/08, 125/11, 78/15, 29/18, 126/21, 114/22, 156/22, 155/23, 69/26
- [5] Mance, M.: Primjena FIDIC Ugovora u praksi, Završni specijalistički rad (2024), Sveučilište u Zagrebu, Pravni fakultet, Zagreb
- [6] Zakon o medijaciji (2026), Narodne novine, br. 27/26.
- [7] Zakon o parničnom postupku (1991), Narodne novine, br. 53/91, 91/92, 58/93, 112/99, 88/01, 117/03, 88/05, 2/07, 84/08, 123/08, 57/11, 25/13, 89/14, 70/19, 80/22.
- [8] Zakon o arbitraži (2001), Narodne novine, br. 88/01.
- [9] Arbitraža i medijacija ključne stavke za efikasnost pravosuđa, www.hgk.hr/arbitraza-i-medijacija-kljucne-stavke-za-efikasnost-pravosuda
- [10] Bult, A.K., Halligan, D.W., Zack, J.G.: Dispute Avoidance and Alternative Dispute Resolution (Chapter 13), Construction Contract Claims, Changes, and Dispute Resolution, American Society of Civil Engineers, pp.347-385, 2016.
- [11] Treacy, T.B.: Use of alternative dispute resolution in the construction industry, JOURNAL OF MANAGEMENT IN ENGINEERING 11 (1995) 1, pp.58-63.
- [12] Gad, G.D., Kalidindi, S.N., Shane, J., Strong, K.: Analytical Framework for the Choice of Dispute Resolution Methods in International Construction Projects Based on Risk Factors, JOURNAL OF LEGAL AFFAIRS AND DISPUTE RESOLUTION IN ENGINEERING AND CONSTRUCTION 3 (2011) 2, pp.79-85.
- [13] Chan, E.H., Suen, H.C., Chan, C.K.: MAUT-Based Dispute Resolution Selection Model Prototype for International Construction Projects, JOURNAL OF CONSTRUCTION ENGINEERING AND MANAGEMENT 132 (2006) 5, pp.444-451.
- [14] Suen, C. H.: A selection model of dispute resolution systems for construction professionals, Master thesis (2001), The University of Hong Kong, Hong Kong
- [15] Cheung, S.O., Suen, C.H.: A multi-attribute utility model for dispute resolution strategy selection, CONSTRUCTION MANAGEMENT AND ECONOMICS 20 (2002) 7, pp.557-568.
- [16] Bing, L., Tiong, R. L.K., Fan, W.W., Chew, D.A.S.: Risk management in international construction joint ventures, JOURNAL OF CONSTRUCTION ENGINEERING AND MANAGEMENT 125 (1999) 4, pp.277-284.
- [17] Zhi, H.: Risk management for overseas construction projects, INTERNATIONAL JOURNAL OF PROJECT MANAGEMENT, 13 (1995) 4, pp.231-237.

Uloga BIM-a u stvaranju ekonomske, organizacijske i održive vrijednosti za SME-ove u građevinskom sektoru

Daša Salvezani¹, Mladen Vukomanović², Lana Lovrenčić Butković³

¹Geotehničko projektiranje d.o.o., dasa.salvezani@geo-pro.hr, dasa.salvezani1@student.grad.hr

²Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, mladen.vukomanovic@grad.unizg.hr

³Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, lane.lovrencic.butkovic@grad.unizg.hr

Sažetak

Informacijsko modeliranje građevina (engl. Building Information Modeling - BIM) u Hrvatskoj postaje regulatorni zahtjev, što posebno opterećuje mikro, mala i srednja poduzeća (engl. Small and Medium-sized Enterprises - SME) s ograničenim kapacitetima. Cilj rada je pregledom literature i tematskom analizom identificirati istraživačka pitanja i predmete daljnjeg istraživanja za lakšu BIM implementaciju u SME-ovima. Saznanja upućuju na potrebu daljnjeg istraživanja monetizacije koristi BIM-a, kritičnih faktora uspjeha za implementaciju i primjenjivosti stranih iskustava u hrvatskom kontekstu.

Ključne riječi: građevinski sektor, informacijsko modeliranje građevina, kritični faktori uspjeha, mikro, mala i srednja poduzeća, monetizacija koristi, povrat ulaganja, regulatorni zahtjevi

The role of BIM in creating economic, organizational and sustainable value for SME in the construction sector

Abstract

Building Information Modeling (BIM) is becoming a regulatory requirement in Croatia, placing particular pressure on small and medium-sized enterprises (SMEs) with limited capacities. The aim of this paper is to identify research questions and possible future research topics for easier BIM implementation in SMEs through a literature review and thematic analysis. The findings indicate the need for further research on BIM benefit monetization, critical success factors for implementation and the applicability of international experience in the Croatian context.

Key words: benefit monetization, building information modelling, construction sector, critical success factors, regulatory requirements, return on investment, small and medium-sized enterprises

1 Uvod

Građevinski sektor obilježavaju fragmentiranost, slaba koordinacija te prekoračenja rokova i troškova, zbog čega se BIM sve više promatra kao metoda digitalnog upravljanja informacijama kroz životni ciklus građevine. U arhitektonsko-inženjersko-građevinskom sektoru (engl. Architecture, Engineering and Construction - AEC) BIM se povezuje s boljom suradnjom, kvalitetnijim odlučivanjem, smanjenjem pogrešaka, kontrolom troškova i upravljanjem projektnim informacijama, ali i s preprekama poput nedostatka znanja, edukacije, regulatorne podrške i spremnosti na promjene [1]. Budući da omogućuje strukturiranje i razmjenu podataka kroz životni ciklus građevine, BIM se povezuje i s održivim praksama, energetskim analizama i optimizacijom resursa [2].

Izvešće Europske komisije o primjeni BIM-a u javnom sektoru EU27 pokazuje da je BIM u javnim projektima već obvezan ili djelomično obvezan u Austriji, Danskoj, Finskoj, Njemačkoj, Italiji, Litvi, Nizozemskoj, Sloveniji, Španjolskoj i Švedskoj, dok su u Latviji, Poljskoj i Bugarskoj predviđeni fazni mandati [3]. Hrvatska je prikazana kao zemlja u početnoj fazi BIM implementacije, no Zakon o gradnji od 1. siječnja 2026. propisuje izradu projekata u BIM okruženju za sve građevine, uz iznimke [4]. Obveza se primjenjuje od 1. siječnja 2031. za građevine za koje dozvole izdaje Ministarstvo, odnosno od 1. siječnja 2035. za građevine za koje dozvole izdaju upravna tijela [4]. Stoga prijelazno razdoblje nije samo administrativni rok, nego vrijeme za razvoj BIM sposobnosti, procesa i kadrovskih kompetencija. Dodatni pritisak proizlazi iz potrebe dokazivanja energetskih i okolišnih učinaka ulaganja, osobito kroz podatke o potrošnji energije, emisijama CO₂ i nefinancijskim pokazateljima, pri čemu BIM može poduprijeti njihovo prikupljanje i strukturiranje [1]. Prema podacima Državnog zavoda za statistiku (DZS), u građevinarstvu 22.250 od 22.274 aktivnih pravnih osoba ima do 249 zaposlenih, dok u stručnim, znanstvenim i tehničkim djelatnostima taj broj iznosi 23.948 od 23.960 [5]. To pokazuje da se BIM implementacija u hrvatskom kontekstu uglavnom odnosi na SME-ove, za koje je zahtjevna zbog ograničenih financijskih, kadrovskih i organizacijskih kapaciteta, što otvara pitanje provedive implementacije u uvjetima regulatornih i tržišnih zahtjeva.

Tablica 1. Pokazatelji na temelju kojih se grupa poduzetnika razvrstava (Izvor: izrada autora)

Kategorija poduzetnika	Ukupna aktiva	Netoprihod	Br. radnika
Mikro poduzetnik	450.000,00 €	900.000,00 €	< 10
Mali poduzetnik	5.000.000,00 €	10.000.000,00 €	< 50
Srednji poduzetnik	25.000.000,00 €	50.000.000,00 €	< 250

Cilj ovoga rada je, na temelju pregleda literature, identificirati istraživačka pitanja, moguće predmete daljnjeg istraživanja i kritične faktore uspjeha za lakšu BIM implementaciju u SME-ovima. Rad se posebno usmjerava na monetizaciju koristi BIM-a, razliku između projektnih koristi i koristi na razini poduzeća te na regulatorne i tržišne zahtjeve koji oblikuju hrvatski kontekst.

2 Metodološki pristup: tematska analiza literature

Rad se temelji na pregledu literature usmjerenom na mapiranje istraživačkog područja (engl. scoping review) i tematskoj analizi radova o BIM-u, SME-ovima, povratu ulaganja (engl. Return on Investment - ROI), troškovima implementacije, organizacijskim uvjetima, regulatornim okvirima i održivosti. Pretraga literature provedena je iterativno, od šireg BIM korpusa prema užem skupu radova relevantnih za SME-ove u AEC sektoru. Python skripte korištene su kao pomoćni alat za dohvat bibliografskih podataka i preliminarno tematsko označavanje. Širi relevantni skup obuhvatio je 117 radova koji povezuju BIM, SME i AEC s najmanje tri dodatne dimenzije, dok je uži relevantni skup obuhvatio 97 radova koji uz BIM, SME, AEC, ROI i održivost uključuju barem jednu dodatnu dimenziju. Kriteriji uključivanja i razvrstavanja prikazani su u Tablici 2.

Početni korpus radova (n=852)

↓ Isključeno: izvan fokusa (n=84) + bez SME fokusa (n=553)

Korpus za tematsko razvrstavanje (n=215)

↓ Kriterij uključivanja/razvrstavanja: BIM + SME + AEC + ≥3 dodatne dimenzije

Širi relevantni skup (n=117)

↓ Kriterij uključivanja/razvrstavanja: BIM + SME + AEC + ROI + održivost + ≥1 dodatna dimenzija

Uži relevantni skup (n=97)

Slika 1. Dijagram toka selekcije i tematskog razvrstavanja literature (Izvor: izrada autora)

Tablica 2. Kriteriji uključivanja i razvrstavanja literature (Izvor: izrada autora)

Skupina radova	Broj	Uloga u analizi
Širi relevantni skup	117	BIM + SME + AEC + barem 3 dimenzije (ROI, troškovi, održivost, trošak životnog ciklusa (engl. Life Cycle Costing - LCC), nefinancijske koristi, organizacijski uvjeti, tržišna niša, regulatorni okvir/standardi, model/okvir odlučivanja)
Uži relevantni skup	97	BIM + SME + AEC + ROI + održivost + barem 1 dimenzija (troškovi, LCC, nefinancijske koristi, organizacijski uvjeti, tržišna niša, regulatorni okvir/standardi, model/okvir odlučivanja)

Nakon početnog razvrstavanja provedena je tematska analiza odabranih radova. Preuzeti radovi pregledani su autorski, pri čemu su za radove izdvojeni predmet istraživanja, metodološki pristup, glavni nalazi, istraživačka praznina i doprinos temi. Usporedbom nalaza iz užeg relevantnog skupa izdvojene su tematske skupine koje se ponavljaju u literaturi i izravno su povezane s ciljem rada. Sažetak glavnih saznanja i njihove implikacije za SME-ove prikazan je u Tablici 3.

Tablica 3. Glavna saznanja iz analizirane literature (Izvor: izrada autora)

Tematska skupina	Glavno saznanje	Implikacija za SME-ove
Prepreke implementacije	Visoki početni troškovi, manjak znanja, ograničeni resursi i slaba standardizacija otežavaju BIM implementaciju [6–8].	Potrebna rana priprema i razvoj internih kapaciteta.
Kritični faktori uspjeha	Ključni su BIM sposobnosti, podrška vodstva, jasne uloge, regulativa, zahtjevi investitora i svijest o ROI-u [9–12].	Povezati BIM s organizacijskim uvjetima.
Monetizacija koristi	Najčešće se monetiziraju smanjenje ponavljanja radova, kraći rokovi, manje izmjena i veća produktivnost [13–15].	Utvrđiti koje se koristi vraćaju poduzeću koje ulaže.
Regulatorni i tržišni pritisci	BIM se u EU uvodi kroz javne projekte, javnu nabavu, standarde i fazne obveze [3, 4, 7, 10, 11].	Razviti BIM kapacitete prije operativne obveze.
Održivost i životni ciklus	BIM se povezuje s LCA, LCC, CO ₂ pokazateljima i energetske analizama [1, 16].	Održive BIM kompetencije mogu postati tržišna prilika.

3 BIM implementacija u mikro, malim i srednjim poduzećima

Istraživanja o BIM implementaciji u SME-ovima pokazuju da prepreke nisu samo tehnološke, nego uključuju financijske, organizacijske, procesne, institucionalne i tržišne uvjete. U malezijskom i novozelandskom kontekstu ističu se ograničen financijski kapacitet, visoki početni troškovi, manjak BIM stručnosti, slabiji pristup digitalnim tehnologijama, nedostatak standardiziranih procesa, interoperabilnost, složen pravni okvir, izostanak zahtjeva klijenata i fragmentirani projektni timovi [6], [7]. Organizacijska spremnost pritom obuhvaća ljude, institucionalnu potporu, menadžment i tehnologiju, uz naglasak na edukaciju, jasne uloge, resurse, BIM iskustvo, ugovore, infrastrukturu, organizacijsku podršku i pozitivan stav prema novoj tehnologiji [8], [9]. Kritični faktori uspjeha potvrđuju važnost zahtjeva investitora, razumijevanja koristi BIM-a, svijesti o povratu ulaganja, učinkovite regulative, tržišnih pritisaka, edukacije, pilot-projekata i podrške vodstva [10]–[12].

Iz analizirane literature proizlazi da BIM implementacija u SME-ovima nije jedan tehnički korak, nego proces koji povezuje ulaganja, ljude, interne procese i vanjske

zahtjeve. Upravo zato se u nastavku rada pitanje BIM-a razmatra kroz monetizaciju koristi, ROI, održivost i istraživačka pitanja relevantna za hrvatski kontekst.

4 Vrijednost BIM-a: ROI, monetizacija koristi i održivost

Za SME-ove nije dovoljno prepoznati koristi BIM-a, nego utvrditi mogu li se pretvoriti u mjerljiv financijski ili poslovni učinak. Troškovi implementacije nastaju odmah kroz licence, opremu, edukaciju, dodatno vrijeme rada i prilagodbu procesa, dok se koristi često pojavljuju kasnije ili kod drugih sudionika projekta. Literatura o BIM ROI-ju najčešće mjeri kraće trajanje projekta, veću produktivnost, manje zahtjeva za informacijama, manje izmjena i smanjenje ponavljanja radova, ali su rezultati teško usporedivi zbog različitih metoda, obuhvata troškova i definicija koristi [13]. Konkretniji pristup nudi monetizacija smanjenja ponavljanja radova. Duarte predlaže okvir u kojem se ROI procjenjuje kroz izbjegnute troškove ponovljenog rada, povezivanjem BIM-a, učinkovitijeg upravljanja gradnjom (engl. Lean Construction) i zajedničkog podatkovnog okruženja (engl. Common Data Environment - CDE) [14]. Financijski učinak povezuje se s ranijim otkrivanjem kolizija, boljom koordinacijom, 4D planiranjem, 5D troškovnim praćenjem i smanjenjem otpada [14]. Za projektantske i inženjerske SME-ove ključno je kome korist pripada: trošak nastaje u modeliranju, edukaciji i koordinaciji, dok se učinci mogu pojaviti tek kod izvođenja, održavanja ili upravljanja građevinom, pa projektna korist nije automatski i poslovna korist za poduzeće koje ulaže. Model BIM ROI-ja za australske SME-ove uključuje opipljive i neopipljive koristi, ali naglašava teškoće njihova mjerenja i pripisivanja konkretnom poduzeću [15]. Održiva vrijednost BIM-a dodatno širi monetizaciju jer se u energetskej obnovi povezuje s učinkovitijim informacijskim tokovima, manjim vremenom i troškovima intervencija te boljim performansama zgrada [16]. Informacijski zahtjevi mogu uključivati emisije CO₂, LCC, procjenu životnog ciklusa (engl. Life Cycle Assessment - LCA), zadovoljstvo korisnika i kvalitetu unutarnjeg okoliša [16]. BIM zato može poduprijeti mjerljive održive pokazatelje, ali ostaje pitanje može li se ta kompetencija naplatiti kroz višu cijenu usluge, dodatne ugovore ili pristup projektima koji traže održive i digitalne podatke. Iz literature proizlazi da se najlakše monetiziraju koristi povezane s vremenom, ponavljanjem radova, izmjenama, zahtjevima za informacijama i produktivnošću [13], [14], dok su znanje, reputacija, organizacijsko učenje, koordinacija, pristup tržištu i održive kompetencije teže izravno mjerljivi [15], [16]. U hrvatskom kontekstu regulatorna obveza smanjuje pitanje treba li BIM uvesti, ali ne i kako SME-ovi mogu pokriti troškove implementacije i monetizirati koristi. Zato daljnje istraživanje treba usmjeriti na koristi koje mogu povećati ROI pojedinog SME-a i na kritične faktore uspjeha njihova ostvarenja, osobito u projektantskim i inženjerskim uredima koji snose početni trošak implementacije.

5 Istraživački jaz i moguća istraživačka pitanja

Literatura BIM implementaciju u SME-ovima, ROI, održivost, regulatorne zahtjeve i kritične faktore uspjeha najčešće obrađuje kao povezane, ali odvojene teme. Ključni istraživački jaz je monetizacija projektnih koristi BIM-a na razini pojedinog SME-a koji ulaže u licence, edukaciju, modeliranje i promjenu internih procesa, osobito kroz smanjenje pogrešaka, izmjena, zahtjeva za informacijama i ponavljanja radova. Drugi jaz obuhvaća kritične faktore uspjeha: financijski kapacitet, edukaciju, BIM kompetencije, podršku vodstva, jasne uloge, standardizirane procese, zahtjeve investitora, regulativu i tržišne pritiske. U hrvatskom kontekstu buduća obvezna primjena BIM-a pomiče pitanje s toga treba li BIM uvesti na to kako ga provesti uz ograničene kapacitete i koje koristi mogu ublažiti trošak prilagodbe. Na temelju navedenog, moguća istraživačka pitanja za daljnji rad su:

1. Koje koristi BIM implementacije mogu biti monetizirane na razini pojedinog SME-a, osobito projektantskog ili inženjerskog ureda, i kako te koristi mogu utjecati na ROI?
2. Koji su kritični faktori uspjeha potrebni da BIM implementacija za SME ne ostane samo dodatni trošak uslijed regulatornih i javnonabavnih zahtjeva?
3. Kako se iskustva zemalja koje su već uvele BIM zahtjeve mogu kontekstualizirati za hrvatske SME-ove u prijelaznom razdoblju do 2031./2035. godine?

Time se predmet daljnjeg istraživanja sužava na monetizaciju koristi i kritične faktore uspjeha BIM implementacije u hrvatskim SME-ovima, posebno u projektantskim i inženjerskim poduzećima koja će morati razviti BIM sposobnosti prije nego što regulatorna obveza postane operativna u projektnoj praksi.

6 Zaključak

U radu je BIM implementacija u SME-ovima, na temelju analizirane literature, razmotrena kroz prepreke, kritične faktore uspjeha, ROI, monetizaciju koristi, organizacijsku spremnost, informacijsko upravljanje i održivost. Nalazi su povezani s hrvatskim kontekstom, u kojem BIM postupno postaje regulatorni i javnonabavni zahtjev, a velik dio građevinskog i projektantsko-inženjerskog sektora čine mikro, mala i srednja poduzeća. Kao kritični faktori uspjeha izdvajaju se financijski kapacitet, dostupnost edukacije, BIM kompetencije, podrška vodstva, jasne uloge i odgovornosti, standardizirani interni procesi, informacijski zahtjevi, zahtjevi investitora i javne nabave, regulatorna jasnoća te mogućnost monetizacije koristi. Najizravnije se monetiziraju koristi povezane s vremenom, produktivnošću, smanjenjem izmjena, zahtjevima za informacijama i ponavljanjem radova, dok su znanje, reputacija, bolja koordinacija, pristup tržištu i održive kompetencije teže izravno mjerljivi. Predmet daljnjeg istraživanja stoga se može usmjeriti na koristi

koje se mogu vratiti pojedinom SME-u koji snosi trošak implementacije, kritične faktore uspjeha za provedivu implementaciju te prilagodbu iskustava zemalja koje su već uvele BIM zahtjeve hrvatskim SME-ovima u prijelaznom razdoblju do 2031./2035. godine.

Literatura

- [1] Datta, S.D., Tayeh, B.A., Hakeem, I.Y., Abu Aisheh, Y.I.: Benefits and barriers of implementing building information modeling techniques for sustainable practices in the construction industry - A comprehensive review, *Sustainability* 15 (2023), 12466.
- [2] Chiozzi, M., Drogemuller, R.: BIM Methodology and Tools Implementation for Construction Companies: GreenBIM Project, *Proceedings of the 36th CIB W78 Conference, Newcastle*, pp. 201-208, 2019.
- [3] European Innovation Council and SMEs Executive Agency: An analysis for the adoption of Building Information Modelling (BIM) across the EU27 for Public Sector, *European Commission*, 2024.
- [4] Hrvatski sabor: Zakon o gradnji, *Narodne novine* 155 (2025).
- [5] Državni zavod za statistiku: Broj i struktura poslovnih subjekata u 2025., <https://podaci.dzs.hr>
- [6] Al-Ashmori, Y.Y., Othman, I., Al-Aidrous, A.M.H., Alashwal, A., Ibrahim, M., Kineber, A.F.: Identifying and assessing BIM implementation challenges and success factors in sustainable building projects among Malaysian SMEs, *Sci Rep* 16, 9177 (2026).
- [7] Hall, A.T., Durdyev, S., Koc, K., Ekmekcioglu, O., Tupenaite, L.: Multi-criteria analysis of barriers to building information modeling (BIM) adoption for SMEs in New Zealand construction industry, *Engineering, Construction and Architectural Management* 30 (9) (2022), 3798-3816.
- [8] Raja Mohd Noor, R.N.H., Abd Aziz, N.A., Yunus, J.N., Abdul Majid, M.R.: Conceptual Framework for Readiness of SMEs Organization Towards BIM Implementation in Construction Projects: Pulau Pinang Case Study, *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences* 13(9) (2023), pp. 2027-2050.
- [9] Rajabi, M.S., Radzi, A.R., Rezaeiashiani, M., Famili, A., Rashidi, M.E., Rahman, R.A.: Key Assessment Criteria for Organizational BIM Capabilities: A Cross-Regional Study, *Buildings* 12 (2022), 1013.
- [10] Hussien, I.G., Rasheed, Z.S., Asaadsamani, P., Sarvari, H.: Perceived Critical Success Factors for Implementing Building Information Modelling in Construction Small- and Medium-Sized Enterprises, *CivilEng* 6(1), (2025), 5.

- [11] Saka, A.B., Chan, D.W.M., Ajayi, S.O.: Institutional Isomorphism and Adoption of Building Information Modelling (BIM) in Small and Medium-sized Enterprises (SMEs) of the Nigerian Construction Industry, *Engineering, Construction and Architectural Management* Vol. 31 No. 1, (2022), pp. 179-199.
- [12] Krischanowski, V., Schnell, P., Bartels, N.: Integrating archetypal insights to overcome barriers in BIM implementation, *Discover Civil Engineering* 3 (2026), 16.
- [13] Sompolgrunk, A., Banihashemi, S., Mohandes, S.R.: Building Information Modelling (BIM) and the Return on Investment: A Systematic Analysis, *Construction Innovation* 23(1) (2023), pp. 129-154.
- [14] Duarte, N.A.S.: Integrated Models of Construction Management Based on BIM for Reduction of Rework in Civil Construction: Proposal of a Return on Investment (ROI) Evaluation Framework, *Revista Gênero E Interdisciplinaridade*, 6(06) (2025), pp., 654-661.
- [15] Abdelhadi, A., Banihashemi, S., Hosseini, M.R., Golzad, H., Hajirasouli, A.: An integrated model of BIM return on investment for Australian small- and medium-sized enterprises (SMEs), *Engineering, Construction and Architectural Management* 30 (5) (2022), pp.: 2048-2074.
- [16] Daniotti, B., Pavan, A., Lupica Spagnolo, S., Caffi, V., Pasini, D., Mirarchi, C., Lucky, M.N.: *Innovative Tools and Methods Using BIM for an Efficient Renovation in Buildings*. Cham: Springer, 2022.

Integracija nerazornih ispitivanja i strojnog učenja u sustav gospodarenja kolnicima

Iva Brkić¹, Josipa Domitrović²

¹Županijska uprava za ceste PGŽ, iva.brkic@student.grad.hr

²Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, josipa.domitrovic@grad.unizg.hr

Sažetak

U sustavu gospodarenja kolnicima određivanje homogenih dionica je važan preduvjet za pouzdanu procjenu stanja kolnika i planiranje mjera održavanja. U radu je dan pregled područja određivanja homogenih dionica, uloge nerazornih metoda ispitivanja, s naglaskom na georadar i deflektometar s padajućim teretom, te mogućnosti primjene strojnog učenja. Zaključno, integracija tih pristupa omogućuje pouzdaniju segmentaciju kolnika i kvalitetniju podršku odlučivanju.

Ključne riječi: sustav gospodarenja kolnicima, homogene dionice, nerazorne metode ispitivanja, georadar, deflektometar s padajućim teretom, strojno učenje, segmentacija kolnika

Integration of non-destructive testing and machine learning in pavement management systems

Abstract

In pavement management systems, the identification of homogeneous sections is important for reliable pavement condition assessment and maintenance planning. This paper presents an overview of homogeneous section identification, the role of non-destructive testing methods, with a particular focus on ground penetrating radar and the falling weight deflectometer, as well as the potential application of machine learning. The integration of these approaches can improve the reliability of pavement segmentation and provide better support for decision-making.

Key words: pavement management, homogeneous sections, non-destructive testing, ground penetrating radar (GPR), falling weight deflectometer (FWD), machine learning, pavement segmentation

1 Uvod

Sustav gospodarenja kolnicima predstavlja organiziran pristup upravljanju i održavanju cestovne mreže s ciljem očuvanja njezine funkcionalnosti i sigurnosti [1]. Učinkovitost ovog sustava izravno ovisi o dostupnosti kvalitetnih i preciznih ulaznih podataka o strukturalnom i funkcionalnom stanju kolnika [2, 3]. Analiza podataka na razini cijele cestovne dionice može dovesti do neracionalnog odabira mjera održavanja i sanacije, osobito na dijelovima prometnice koji ne zahtijevaju jednaku razinu intervencije [4, 5]. Stoga je jedan od ključnih koraka u procjeni stanja kolnika podjela prometnice na homogene dionice, odnosno na segmente koji su dovoljno ujednačeni s obzirom na promatrane karakteristike [2, 4, 5]. Tradicionalni pristupi određivanju homogenih dionica uglavnom su se temeljili na ograničenom broju podataka iz projektne dokumentacije te na točkastim destruktivnim ispitivanjima, poput uzimanja uzoraka jezgri kolničke konstrukcije, koja daju točne podatke samo na lokacijama uzimanja uzoraka i ne omogućuju uvid u promjene karakteristika duž prometnice [3, 6]. Nerazorne metode ispitivanja, poput georadara i deflektometra s padajućim teretom, omogućuju kontinuirano prikupljanje podataka o strukturalnom stanju kolnika bez oštećivanja kolničke konstrukcije [2, 3, 6]. Uz razvoj suvremenih metoda prikupljanja podataka, raste i potreba za naprednijim pristupima njihovoj obradi. Razvoj informacijskih tehnologija i umjetne inteligencije otvorio je mogućnosti primjene pristupa temeljenih na podacima (eng. data-driven approach) i strojnom učenju pri ocjeni stanja kolnika [1, 7]. Takvi pristupi olakšavaju obradu većih skupova podataka te pružaju podršku u homogenizaciji i planiranju mjera održavanja i sanacije [1].

Iako su u literaturi razvijeni brojni pristupi za određivanje homogenih dionica, njihova primjena u praksi i dalje je često ograničena na pojedinačne pokazatelje stanja ili djelomičnu interpretaciju rezultata ispitivanja. Za donošenje ispravnih odluka o održavanju potrebno je povezati nerazorna ispitivanja sa suvremenim metodama obrade podataka unutar sustava gospodarenja kolnicima. U radu se daje pregled metoda za određivanje homogenih dionica te uloge nerazornih ispitivanja. Cilj je usporediti tradicionalne i suvremene pristupe te predložiti integraciju podataka dobivenih nerazornim metodama ispitivanja i strojnog učenja, čime se osigurava podloga za pouzdaniju segmentaciju mreže i optimizaciju donošenja odluka u sustavu gospodarenja kolnicima.

2 Homogene dionice u sustavu gospodarenja kolnicima

Promatranje ceste kao jedinstvene cjeline može dovesti do neracionalnih odluka u planiranju održavanja, budući da se svojstva kolnika (nosivost, ravnost, oštećenja) značajno mijenjaju duž dionice, što zahtijeva različite razine intervencije [4,

5]. Homogene dionice mogu se definirati kao dijelovi ceste koji su unutar svojih granica relativno ujednačeni s obzirom na promatrane parametre [5]. Granice homogenih dionica određuju se na mjestima gdje dolazi do izraženijih promjena u promatranim svojstvima kolnika [4, 5, 8]. Takva podjela ceste je važna jer omogućuje pouzdaniju procjenu postojećeg stanja kolnika, racionalnije planiranje mjera održavanja i sanacije te učinkovitiju raspodjelu raspoloživih sredstava unutar sustava gospodarenja kolnicima [1, 9].

Pri određivanju homogenih dionica tradicionalno se primjenjuju jednoparametarski pristupi, odnosno statističke metode. Oslanjanje na samo jedan parametar zahtijeva ponavljanje cjelokupnog postupka za svaki dodatni pokazatelj stanja, što produljuje analizu i povećava vjerojatnost pogrešaka pri interpretaciji rezultata [8]. Od statističkih jednoparametarskih pristupa izdvajaju se Bayesov pristup i minimizacija sume kvadrata pogrešaka (eng. *Minimization of Sum of Squared Errors* – MINSSE). Bayesov pristup probabilistički identificira točke promjene i procjenjuje pouzdanost segmentacije, no primjena mu je ograničena računalnom složenosti. Metoda MINSSE granice određuje minimiziranjem odstupanja unutar pojedinih segmenata, uvažavajući praktična ograničenja poput minimalne duljine dionice. Glavni nedostatak statističkih metoda je osjetljivost na lokalne varijacije podataka, što zbog uvažavanja manje značajnih promjena rezultira povećanjem broja dionica nepraktičnih za održavanje [4]. S obzirom na nedostatke tradicionalnih pristupa sve se više primjenjuju višekriterijski pristupi koji objedinjuju podatke o različitim pokazateljima stanja kolnika te pristupi temeljeni na metodama strojnog učenja, koji omogućuju pouzdanije određivanje homogenih dionica u uvjetima većeg broja ulaznih podataka [2, 4, 8, 9].

Pri određivanju homogenih dionica tradicionalno se primjenjuju jednoparametarski pristupi, odnosno statističke metode. Oslanjanje na samo jedan parametar zahtijeva ponavljanje cjelokupnog postupka za svaki dodatni pokazatelj stanja, što produljuje analizu i povećava vjerojatnost pogrešaka pri interpretaciji rezultata [8]. Od statističkih jednoparametarskih pristupa izdvajaju se Bayesov pristup i minimizacija sume kvadrata pogrešaka (eng. *Minimization of Sum of Squared Errors* – MINSSE). Bayesov pristup probabilistički identificira točke promjene i procjenjuje pouzdanost segmentacije, no primjena mu je ograničena računalnom složenosti. Metoda MINSSE granice određuje minimiziranjem odstupanja unutar pojedinih segmenata, uvažavajući praktična ograničenja poput minimalne duljine dionice. Glavni nedostatak statističkih metoda je osjetljivost na lokalne varijacije podataka, što zbog uvažavanja manje značajnih promjena rezultira povećanjem broja dionica nepraktičnih za održavanje [4]. S obzirom na nedostatke tradicionalnih pristupa sve se više primjenjuju višekriterijski pristupi koji objedinjuju podatke o različitim pokazateljima stanja kolnika te pristupi temeljeni na metodama strojnog učenja, koji omogućuju pouzdanije određivanje homogenih dionica u uvjetima većeg broja ulaznih podataka [2, 4, 8, 9].

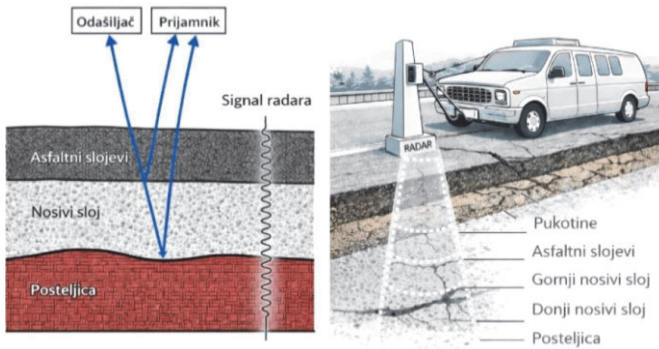
Pri određivanju homogenih dionica u obzir se uzima minimalna duljina istih, budući da segmenti moraju biti dovoljno dugi za tehnički i ekonomski opravdanu provedbu mjera održavanja. U literaturi se preporučena minimalna duljina dionice razlikuje ovisno o razini analize, vrsti cestovne mreže, raspoloživim podacima i pravilima pojedinog sustava gospodarenja kolnicima. U radu [4] autori navode da se minimalna duljina segmenta najčešće definira u rasponu od 100 do 300 m, ponajprije zbog tehničkih ograničenja provedbe zahvata i troškova održavanja. S druge strane, noviji radovi za potrebe planiranja održavanja na mrežnoj i projektnoj razini preporučuju dulje segmente. Autori u radu [8] za projektno usmjerene analize navode minimalnu duljinu homogenih dionica od 300 m, u radu [10] za autoceste navode dionice duljine 500 m kao praktično rješenje koje predstavlja kompromis između osjetljivosti na promjene stanja kolnika i provedivosti mjera održavanja. Prekratki segmenti mogu dovesti do prekomjerne segmentacije i otežati provedbu sanacije, dok predugi mogu prikriti lokalne promjene stanja kolnika [4, 8, 10].

U praksi brojni sustavi gospodarenja kolnicima, uključujući Highway Development and Management Model (HDM-4), temelje analizu na homogenim dionicama kao osnovnim jedinicama za modeliranje promjene stanja kolnika i planiranje mjera održavanja, što dodatno potvrđuje važnost njihova pravilnog definiranja [11].

3 Nerazorna ispitivanja u definiranju homogenih dionica

Nerazorne metode ispitivanja imaju važnu ulogu u sustavu gospodarenja kolnicima jer omogućuju brzo, objektivno i kontinuirano prikupljanje podataka o stanju kolnika duž cijele dionice, bez oštećivanja kolničke konstrukcije [2],[3]. U praksi se za procjenu strukturalnog stanja i određivanje homogenih dionica najčešće primjenjuju georadar (eng. *Ground Penetrating Radar* - GPR) i deflektometar s padajućim teretom (eng. *Falling Weight Deflectometer* - FWD), dok se rezultati po potrebi dopunjuju podacima o ravnosti kolnika (eng. International Roughness Indeks, IRI), površinskim oštećenjima i drugim funkcionalnim pokazateljima [2, 3, 12].

Georadar omogućuje brzo i kontinuirano prikupljanje podataka o strukturi kolnika bez oštećivanja kolničke konstrukcije [3, 6]. Metoda se temelji na odašiljanju elektromagnetskih valova i analizi njihovih refleksija na granicama slojeva različitih svojstava, čime se omogućuje procjena debljine slojeva i uočavanje promjena u strukturi kolnika (slika 1.) [2]. GPR omogućuje prepoznavanje nepravilnosti u strukturi kolničke konstrukcije, poput šupljina, zona povećane vlage i drugih karakteristika koje nisu vidljive na površini kolnika. Za razliku od uzimanja uzoraka jezgri, koje daju podatke na pojedinačnim lokacijama, georadar omogućuje kontinuirani uvid u promjene debljine i karakteristika slojeva duž cijele dionice [2, 6].



Slika 1. Shematski prikaz načela rada georadara (GPR)

FWD je nerazorna metoda za procjenu strukturalnog stanja kolnika. Simulira dinamičko opterećenje kotača vozila i mjeri defleksijski odziv kolničke konstrukcije. Osnovni rezultat ispitivanja je defleksijska krivulja, koja omogućava procjenu nosivosti kolnika i uočavanje promjena u nosivosti duž dionice. U kombinaciji s podacima o debljinama slojeva omogućuje provođenje postupka povratnog proračuna za procjenu modula elastičnosti slojeva kolničke konstrukcije. Zbog mogućnosti detektiranja promjene nosivosti, FWD ima važnu ulogu u određivanju granica homogenih dionica [2, 3].

Integracija GPR i FWD podataka omogućuje cjelovitiju procjenu stanja kolnika, pri čemu GPR daje podatke o debljinama slojeva i promjenama u strukturi, a FWD o nosivosti kolnika [3, 6]. Budući da postupak povratnog proračuna ovisi o točnosti podataka o debljinama slojeva, GPR podaci predstavljaju važnu podlogu za interpretaciju rezultata FWD mjerenja. Primjerice, pogreška u debljini asfaltnog sloja od samo 15% može dovesti do precjenjivanja modula elastičnosti za čak 50% [6]. Homogene dionice sve se češće određuju višekriterijskim pristupom koji, uz GPR i FWD podatke, po potrebi uključuje i pokazatelje ravnosti kolnika (IRI), površinskih oštećenja, otpornosti na klizanje te prometnog opterećenja, čime se postiže pouzdanija segmentacija kolnika [2, 8].

Iako nerazorne metode omogućuju prikupljanje velike količine podataka, njihovu širu primjenu u praksi otežavaju složenija obrada podataka, visoki početni troškovi i otpor prema novim tehnologijama unutar cestovnih uprava [1, 6]. Zbog toga se sve više istražuje primjena pristupa temeljenih na podacima i strojnom učenju u analizi stanja kolnika i određivanju homogenih dionica.

4 Primjena strojnog učenja u sustavu gospodarenja kolnicima

Za razliku od tradicionalnih pristupa temeljenih na ručnom prikupljanju podataka i subjektivnim procjenama, suvremeni pristup prikupljanja podataka nerazornim ispitivanjima i njihova računalna obrada omogućuju točnije i objektivnije definiranje stanja kolnika [1]. Velike količine podataka o stanju kolnika dobivene nerazornim metodama zahtijevaju učinkovite postupke obrade kako bi se rezultati mogli pouzdano koristiti u analizi stanja i planiranju mjera održavanja [12]. Pogoršanje stanja kolnika nije linearno tijekom vremena, prvih 50 do 75 % uporabnog vijeka stanje kolnika ostaje relativno stabilno, dok do izraženijeg pogoršanja najčešće dolazi u kasnijim fazama [7]. Zbog toga se pristupi temeljeni na strojnom učenju sve češće primjenjuju kao pomoć pri obradi većih skupova podataka, prepoznavanju obrazaca promjene stanja kolnika i planiranju mjera održavanja.

U sustavima gospodarenja kolnicima pristupi temeljeni na strojnom učenju najčešće se primjenjuju pri određivanju homogenih dionica, predviđanju budućeg stanja kolnika te kao podrška pri planiranju održavanja i sanacije [7, 12]. U određivanju homogenih dionica pritom se često koriste metode grupiranja, poput K-means algoritma i samoorganizirajućih mapa (eng. Self-Organizing Maps, SOM), koje omogućuju prepoznavanje dionica sličnih strukturalnih i funkcionalnih karakteristika [9, 12]. Jedno od važnih područja primjene pristupa temeljenih na strojnom učenju je računalni vid (eng. Computer Vision). Posebno je važan kao zamjena za tradicionalne vizualne preglede, koji su često spori i podložni subjektivnoj procjeni. U praksi se najčešće koristi za automatsku detekciju i klasifikaciju površinskih oštećenja kolnika [1].

Za predviđanje budućeg stanja kolnika primjenjuju se modeli umjetnih neuronskih mreža (eng. Artificial Neural Networks, ANN) te modeli poput algoritma slučajne šume (eng. Random Forest), koji su prikladni za analizu složenih odnosa između prometnog opterećenja, klimatskih utjecaja i svojstva materijala [1, 7]. Kod donošenja odluka strojno učenje pruža podršku pri određivanju prioriteta i odabiru odgovarajućih mjera održavanja i sanacije, dok se u literaturi u tu svrhu navode i optimizacijski pristupi, poput genetskih algoritama [1].

Uspješna primjena strojnog učenja u sustavima gospodarenja kolnicima ovisi o kvaliteti i reprezentativnosti ulaznih podataka, zbog čega su kontinuirani i objektivni podaci prikupljeni nerazornim metodama ispitivanja od posebne važnosti [1, 13]. Međutim, sama dostupnost podataka nije dovoljna, jer pouzdanost takvih pristupa uvelike ovisi o načinu njihove obrade i međusobnog povezivanja te o pravilnoj interpretaciji rezultata. Dodatni izazov predstavlja i činjenica da je složenije modele često teže interpretirati, zbog čega metode strojnog učenja treba promatrati kao alat podrške, a ne kao zamjenu za inženjersku prosudbu [1].

5 Zaključak

Određivanje homogenih dionica jedan je od ključnih postupaka u sustavu gospodarenja kolnicima koji omogućuje pouzdanu procjenu stanja, racionalno planiranje održavanja i učinkovitu raspodjelu sredstava. Postupak zahtijeva integraciju podataka prikupljenih nerazornim ispitivanjima (GPR, FWD, IRI) te pokazatelja površinskih oštećenja i prometnog opterećenja. Glavna prednost takvog integriranog pristupa očituje se u osiguravanju visokokvalitetnih podloga za donošenje odluka, čime se izravno doprinosi optimizaciji prioriteta održavanja i racionalizaciji financijskih resursa.

Velika količina podataka dobivenih nerazornim ispitivanjima nameće primjenu strojnog učenja za određivanje homogenih dionica, predikciju stanja i planiranje održavanja kolnika. Buduća istraživanja trebala bi obuhvatiti uspostavu integrirane baze podataka koja objedinjuje podatke o prometnom opterećenju te funkcionalnim i strukturalnim pokazateljima stanja kolnika, na temelju koje će se primjenom i validacijom algoritama strojnog učenja razviti pouzdani modeli za određivanje homogenih dionica. Budući da pouzdanost navedenih modela ovisi o kvaliteti ulaznih podataka, treba ih promatrati kao podršku, a ne kao zamjenu za inženjersku prosudbu.

Literatura

- [1] Tamagusko, T., Gomes Correia, M., Ferreira, A.: Machine Learning Applications in Road Pavement Management: A Review, Challenges and Future Directions, *Infrastructures* 9 (2024) 12, p. 213.
- [2] Plati, C., Armeni, A., Loizos, A.: Integration of Non-Destructive Testing Technologies for Effective Monitoring and Evaluation of Road Pavements, *NDT* 2 (2024) 4, pp. 430-444.
- [3] Domitrović, J., Rukavina, T.: Application of GPR and FWD in Assessing Pavement Bearing Capacity, *Romanian Journal of Transport Infrastructure* 2 (2013) 2, pp. 11-21.
- [4] Cafiso, S., Di Graziano, A.: Definition of Homogenous Sections in Road Pavement Measurements, *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 53 (2012), pp. 1069-1079.
- [5] Misra, R., Das, A.: Identification of Homogeneous Sections from Road Data, *International Journal of Pavement Engineering* 4 (2003) 4, pp. 229-233.
- [6] Marecos, V., Fontul, S., De Lurdes Antunes, M., Solla, M.: Evaluation of a Highway Pavement Using Non-Destructive Tests: Falling Weight Deflectometer and Ground Penetrating Radar, *Construction and Building Materials* 154 (2017), pp. 1164-1172.

- [7] Domitrović, J., Dragovan, H., Rukavina, T., Dimiter, S.: Application of an Artificial Neural Network in Pavement Management System, *Tehnički vjesnik* 25 (2018) Suppl. 2, pp. 466-473.
- [8] Peraka, N.S.P., Biligiri, K.P., Kalidindi, S.N.: Multi-Parametric Delineation Approach for Homogeneous Sectioning of Asphalt Pavements, *Infrastructures* 8 (2023) 10, p. 153.
- [9] Mukhtarli, K., Nik-Bakht, M., Amador-Jimenez, L.: Data-driven Homogeneous Pavement Groups—Soft Versus Hard Clustering, *International Journal of Pavement Research and Technology* 16 (2023) 5, pp. 1135-1157.
- [10] Jannat, G.E., Henning, T.F.P., Zhang, C., Tighe, S.L., Ningyuan, L.: Road Section Length Variability on Pavement Management Decision Making for Ontario, Canada, *Highway Systems*, *Transportation Research Record* 2589 (2016), pp. 87-96.
- [11] Čutura, B., Mladenović, G., Mazić, B., Lovrić, I.: Application of the HDM-4 Model on Local Road Network: Case Study of the Herzegovina-Neretva Canton in Bosnia and Herzegovina, *Transportation Research Procedia* 14 (2016), pp. 3021-3030.
- [12] Mukhtarli, K.: Machine Learning for Homogeneous Grouping of Pavements, Master of Applied Science (Civil Engineering) Thesis, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada, 2020.
- [13] Justo-Silva, R., Ferreira, A., Flintsch, G.: Review on Machine Learning Techniques for Developing Pavement Performance Prediction Models, *Sustainability* 13 (2021) 9, p. 5248.

Pojačanje fasadnih zidanih zidova čeličnim okvirima

Hrvoje Vukić¹, Marko Bartolac², Josip Galić³

¹Sveučilište u Zagrebu Arhitektonski fakultet, hrvoje.vukic@arhitekt.hr

²Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, marko.bartolac@grad.unizg.hr

³Sveučilište u Zagrebu Arhitektonski fakultet, josip.galic@arhitekt.hr

Sažetak

Zidane zgrade čine velik dio povijesnoga fonda, a zbog male vlačne i posmične otpornosti nearmiranog зида posebno su osjetljive na potresno djelovanje. U radu se daje pregled najčešćih tehnika seizmičkog pojačanja, s naglaskom na rješenja kojima se postiže optimalno pojačanje imajući u vidu složenost intervencije i povezivanje s energetsom obnovom. Kao istraživački zanimljivo rješenje izdvojeno je pojačanje čeličnim okvirima, uz razmatranje krutosti okvira, načina sidrenja i povezivanja zategama tijekom obnove ovojnice postojećih zgrada iz razloga jer bi se takvi okviri mogli ugraditi zajedno s vanjskom stolarijom u sklopu energetske obnove pročelja zgrade.

Ključne riječi: nearmirano зиђе, seizmičko pojačanje, fasadni zid, otvor u zidu, čelični okvir, energetska obnova

Retrofitting of facade masonry walls with steel frames

Abstract

Masonry buildings constitute a large part of the historic building stock and, due to the low tensile and shear resistance of unreinforced masonry, they are particularly vulnerable to seismic action. This paper provides an overview of the most common seismic strengthening techniques, with an emphasis on solutions that enable optimal strengthening while considering the complexity of the intervention and its integration with energy retrofit measures. Strengthening with steel frames is identified as a particularly interesting research direction, with consideration given to frame stiffness, anchorage details, and connection using steel ties during the renovation of the building facade. Such frames could potentially be installed together with external windows as part of the energy retrofit of the building facade.

Key words: unreinforced masonry, seismic strengthening, facade wall, wall opening, steel frame, energy retrofit

1 Uvod

Zidane građevine pripadaju najstarijim i najraširenijim konstrukcijskim sustavima, a značajan dio postojećega fonda nalazi se u seizmički aktivnim područjima. Kod nearmiranog zida nosivost na tlačna naprezanja je relativno povoljno s obzirom na njihovu debljinu, ali je otpornost takvog zida na vlačna i posmična djelovanja mala, pa se tijekom djelovanja potresa često razvijaju mehanizmi oštećenja i gubitka nosivosti [1, 2]. Posebno su osjetljive zgrade projektirane i izvedene prije suvremenih protupotresnih propisa jer njihov konstruktivni sustav, nedovoljna povezanost zidova i stropova te stanje samog građevnog sredstva jednostavno ne može zadovoljiti današnje zahtjeve važećih propisa na seizmičko djelovanje [3, 4].

U povijesnim gradskim cjelinama problem otpornosti na seizmičko djelovanje dodatno se preklapa s potrebom očuvanja arhitektonskog identiteta i s energetsom obnovom ovojnice. Primjer zagrebačkih donjogradskih blokova pokazuje velik udio zidanih zgrada s punom opekam, vapnenim ili vapneno-cementnim mortom te drvenim međukatnim konstrukcijama [5]. Intervencije na pročeljima na takvim zgradama zahtijevaju oprez jer se moraju uravnotežiti zahtjevi za smanjenje potrošnje energije, podići energetska učinkovitost, te također očuvati povijesno oblikovni detalji i osigurati propisana uporabljivost građevine [6]. Istraživački problem doktorskog rada jest pojačanje fasadnih zidanih zidova s otvorima na način koji je konstrukcijski učinkovit, minimalno invazivan prema pročelju i izvediv u sklopu energetske obnove ovojnice. Cilj je eksperimentalno i numerički odrediti doprinos čeličnih okvira u zoni postojećih otvora, s naglaskom na utjecaj krutosti okvira, načina sidrenja i povezivanja susjednih otvora zategama, budući da je dosad istražen samo doprinos okvira ugrađenog nakon izvedbe novog otvora u zidu [31].



Slika 1. Razdoblja izgradnje građevnog fonda u Povijesnoj urbanoj cjelini Grada Zagreba [5]

2 Problematika fasadnih zidova s otvorima

Tipični konstruktivni sustav zgrada u donjogradskom bloku jest da su glavne nosive osi u uzdužnom smjeru postavljene uglavnom u tri osi, središnjeg dijela i vanjskih obodnih koju čine fasadni zidovi. U poprečnom smjeru to su uglavnom zabatni zidovi puno manjih dimenzija i krutosti. Fasadni zidovi povijesnih zidanih zgrada rijetko su puni zidni paneli, jer prema uličnoj strani imaju veliki broj otvora. Otvori za prozore i vrata dijele ih na međuprozorske stupce i nadvoje, pa seizmički odgovor ovisi o lokalnoj nosivosti tih elemenata i o njihovoj međusobnoj povezanosti. Kod djelovanja horizontalne sile od potresa u ravnini zida, takvi zidovi mogu otkazati savijanjem (prevrtanje), tlačnim drobljenjem, klizanjem po sljubnici ili dijagonalnim vlačnim slomom. Kod nepovoljnog omjera visine i širine međuprozorskog dijela, niske tlačne sile ili lošeg vezivnog sredstva (morta), posmični slom i dijagonalne vlačne pukotine mogu se razviti naglo, uz ograničenu duktilnost i malu sposobnost disipacije energije [7, 10, 12].

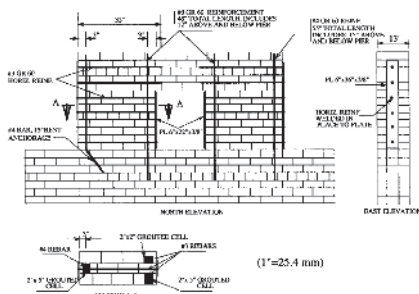
Ponašanje zidanog pročelja s otvorima stoga se ne može promatrati samo kao problem globalne nosivosti zgrade. Lokalni gubitak nosivosti međuprozorskog zida može promijeniti raspodjelu sila, dovesti do oštećenja nadvoja i ugroziti vezu pročelja s poprečnim zidovima ili stropovima. U zgradama s fleksibilnim drvenim stropovima dodatno je važno osigurati prijenos horizontalnih sila i smanjiti mogućnost izbacivanja zidova izvan ravnine [2, 9]. Za građevine kulturne baštine i za reprezentativna pročelja prednost imaju mjere koje povećavaju cjelovitost i nosivost, ali ne uvode nepotrebnu masu i ne mijenjaju bitno izgled građevine [8].

3 Pregled tehnika pojačanja zidanih zidova

Prva konkretnija pravila za obnovu i pojačanje zidanih zgrada nastajala su nakon velikih potresa u Italiji, osobito nakon događaja u Friuliju i Campaniji/Basilicatu. Primjenjivale su se metode injektiranja i zapunjavanja šupljina, armiranobetonske obloge (torkreti) i okviri, ojačanja čeličnim trakama, nove međukatne ploče i različiti oblici povezivanja zidova [11]. Iskustvo je pokazalo da učinkovitost pojačanja ne ovisi samo o povećanju proračunske otpornosti, nego i o kompatibilnosti materijala, reverzibilnosti i mogućnosti kontrole izvedbe.

Danas se za pojačanje zida koriste tradicionalne i suvremene metode. Injektiranje i ponovno fugiranje mogu poboljšati homogenost zida i posmičnu otpornost, ali njihova učinkovitost ovisi o vrsti zida, volumenu šupljina, kvaliteti pripreme i dubini zahvata [13, 19]. Armiranobetonske ili cementne obloge (torkreti) mogu znatno povećati nosivost i krutost, ali su invazivne, povećavaju masu, mijenjaju paropropusnost i često nisu prikladne za pročelja koja treba očuvati te imaju problem ovijanja i korozije [15, 24]. Kompozitni sustavi, primjerice FRP, FRCM, TRM

i SRG, omogućuju laku primjenu i ne mijenjaju ponašanje zida i masu značajno, no razlikuju se prema kompatibilnosti s podlogom, ponašanju spoja i zahtjevima za izvedbu [18, 20, 21, 26]. Dodatno se istražuju naknadno napinjanje, SFRM obloge, izolacija temelja i sustavi s čeličnim trakama, pri čemu svaka metoda ima ograničenja vezana uz cijenu, dostupnost, razinu intervencije i primjenjivost na vrijednim pročeljima [22, 23, 25, 27].



Slika 2. Primjer pojačanja zidanog zida s otvorom ugrađenim čeličnim šipkama i pločama [13]

Za fasadne zidove s otvorima posebno su važna pojačanja međuprozorskih dijelova i zona oko otvora. Ispitivanja pojačanih zidanih stupaca pokazala su da pravilno uvedena horizontalna i vertikalna armatura može povećati posmičnu nosivost i deformacijsku sposobnost, ali i promijeniti oblik sloma [12, 13]. Abrams i suradnici usporedili su više tehnika sanacije međuprozorskih dijelova i napomenuli da neojačano zide u određenim uvjetima može imati stabilno savijanje i znatnu deformacijsku sposobnost [17].

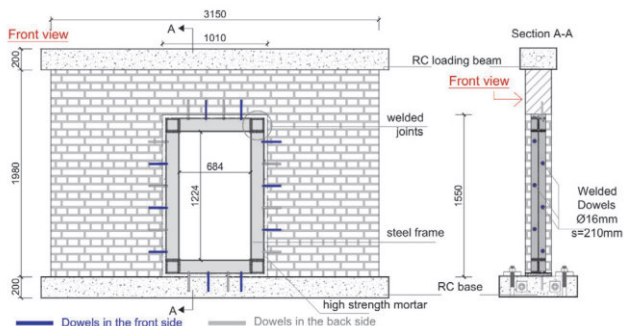
4 Pojačanje čeličnim elementima i čeličnim okvirima

Čelik je za pojačanje zidanih zidova zanimljiv zbog velike vlačne nosivosti, relativno male dodane mase, mogućnosti mehaničkog sidrenja i potencijalne reverzibilnosti. U zidovima s otvorima čelični elementi mogu djelovati kao rubna pojačanja, spregnuti okviri, zatege ili veze između lica zida, pri čemu preuzimaju vlačne sile koje zide ne može preuzeti i ograničavaju otvaranje glavnih pukotina. Mjerodavan pritom nije samo kapacitet čeličnog profila, nego i stvarna krutost spoja čelik-zide, lokalna nosivost sidara, posmični prijenos na kontaktu [14, 15, 16, 31].

Čelični prstenasti okvir oko otvora predstavlja jasno definiranu varijantu ovog pristupa. Oña Vera i suradnici ispitali su zid od pune opeke s novim izvedenim otvorom ojačanim zatvorenim čeličnim okvirom od četiri zavarena HEA140 profila, uz sidrenje glatkim moždanicima $\varnothing 16$ mm u okolno zide i zapunjavanje razmaka visokokvalitetnim mortom [31]. Kvazistatičko cikličko ispitivanje i numerička

analiza pokazali su da takav sustav može vratiti posmičnu nosivost i duktilnost razine punog zida, ali ne i početnu bočnu krutost. Pritom je dosad ispitana samo jedna konfiguracija okvira, i to isključivo kao kompenzacija naknadno izvedenog otvora u punom zidu; doprinos okvira različite krutosti i okvira međusobno povezanih zategama u dostupnoj literaturi nije analiziran.

U nastavku doktorskog istraživanja stoga će se novo ispitivati: utjecaj krutosti čeličnog okvira (izbora profila i detalja spojeva) na nosivost, krutost i mehanizam sloma zida s otvorom; način sidrenja okvira u okolno zide i njegov utjecaj na prijenos sila, lokalno drobljenje opeke i morta te klizanje po sljubnicama; učinak povezivanja susjednih otvora pasivnim čeličnim zategama na preraspodjelu sila između međuprozorskih stupaca; numeričko modeliranje sustava zide–okvir–sindra kalibrirano na eksperimentalnim rezultatima [28, 29, 30]; te usporedba različitih varijanti pojačanja (neojačani zid s otvorom, prstenasti okvir, okviri različite krutosti, okviri povezani zategama). Očekivani izvorni doprinos jest kvantificiranje utjecaja navedenih parametara i izrada smjernica za projektiranje čeličnih okvira kao pojačanja fasadnih zidanih zidova.



Slika 3. Shematski prikaz čeličnog prstenastog okvira po opsegu novog otvora, sa zavarenim HEA profilima i moždanicima Ø16 mm [31]

5 Zaključak

Seizmička obnova povijesnih zidanih zgrada zahtijeva rješenja koja povećavaju nosivost, duktilnost i cjelovitost konstrukcije, ali pritom poštuju ograničenja zaštite pročelja i zahtjeve energetske obnove. Pregled literature pokazuje da postoje brojne učinkovite metode pojačanja nearmiranog zida, no velik dio njih uvodi znatnu promjenu mase, krutosti, paropropusnosti ili izgleda građevine. Čelični elementi predstavljaju povoljnu skupinu rješenja jer mogu preuzeti vlačna naprezanja, stabilizirati međuprozorske dijelove i kontrolirati mehanizme raspucavanja uz relativno malu dodanu masu.

Rezultati ispitivanja čeličnog prstenastog okvira pokazuju da zatvoreni okvir oko otvora može obnoviti nosivost i duktilnost, ali da krutost sustava ostaje osjetljiva na profil, sidrenje i stvarni kontakt s okolnim zidom [31]. Zbog toga je pojačanje čeličnim okvirima vrijedno daljnje provjere: može se uklopiti u zonu otvora, povezati sa zahvatima na stolariji i ovojnici te ostati gotovo nevidljivo na pročelju. Dok je ponašanje prstenastog okvira oko novoizvedenog otvora poznato [31], utjecaj krutosti okvira, načina sidrenja i povezivanja susjednih otvora zategama dosad nije istražen; sustavna eksperimentalna i numerička usporedba tih varijanti činit će izvorni doprinos nastavka istraživanja i podlogu za smjernice za primjenu u obnovi fasadnih zidanih zidova.

Literatura

- [1] S. Bhattacharya, S. Nayak, i S. C. Dutta, "A critical review of retrofitting methods for unreinforced masonry structures", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, sv. 7, str. 51-67, 2014.
- [2] M. Tomažević, "Protupotresna obnova postojećih zidanih građevina", *Građevinar*, sv. 52, izd. 11, str. 683-693, 2000.
- [3] M. Tomažević, *Earthquake-resistant design of masonry buildings*. River Edge, NJ: Imperial College Press, 1999.
- [4] HRN EN 1998-3: Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija - 3. dio: Ocjenjivanje i obnova zgrada. Hrvatski zavod za norme, 2011.
- [5] Z. Veršić, I. Muraj, i M. Binički, "Model ugrađene najamne zgrade zagrebačkog donjogradskog bloka", *Prostor*, sv. 23, izd. 2, str. 236-249, 2015.
- [6] A. L. Webb, "Energy retrofits in historic and traditional buildings: A review of problems and methods", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, sv. 77, str. 748-759, 2017.
- [7] M. Tomažević, "Seismic design of masonry structures", *Progress in Structural Engineering and Materials*, sv. 1, izd. 1, str. 88-95, 1997.
- [8] A. Borri i M. Corradi, "Architectural Heritage: A Discussion on Conservation and Safety", *Heritage*, sv. 2, izd. 1, str. 631-647, 2019.
- [9] I. N. Psycharis, S. J. Pantazopoulou, i M. Papadrakakis, ur., *Seismic Assessment, Behavior and Retrofit of Heritage Buildings and Monuments*, sv. 37. Cham: Springer, 2015.
- [10] D. F. D'Ayala i S. Paganoni, "Assessment and analysis of damage in L'Aquila historic city centre after 6th April 2009", *Bulletin of Earthquake Engineering*, sv. 9, izd. 1, str. 81-104, 2011.

- [11] C. Modena, "Repair and Upgrading Techniques of Unreinforced Masonry Structures Utilized after the Friuli and Campania/Basilicata Earthquakes", *Earthquake Spectra*, sv. 10, izd. 1, str. 171-185, 1994.
- [12] H. Sucuoglu i H. D. McNiven, "Seismic Shear Capacity of Reinforced Masonry Piers", *Journal of Structural Engineering*, sv. 117, izd. 7, str. 2166-2185, 1991.
- [13] T. Manzouri, M. P. Schuller, P. B. Shing, i B. Amadei, "Repair and Retrofit of Unreinforced Masonry Structures", *Earthquake Spectra*, sv. 12, izd. 4, str. 903-922, 1996.
- [14] D. C. Rai i S. C. Goel, "Seismic Strengthening of Unreinforced Masonry Piers with Steel Elements", *Earthquake Spectra*, sv. 12, izd. 4, str. 845-862, 1996.
- [15] A. Borri, M. Corradi, G. Castori, i A. Molinari, "Stainless steel strip - A proposed shear reinforcement for masonry wall panels", *Construction and Building Materials*, sv. 211, str. 594-604, 2019.
- [16] J. Lee, K. Kim, H. Kim, J. Kim, S. Oh, i S. Lee, "Seismic Retrofitting Effects of Retrofitted Unreinforced Masonry Walls Using Metal Laths and Steel Plates", *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, sv. 14, izd. 3, str. 63-70, 2014.
- [17] D. Abrams, T. Smith, J. Lynch, i S. Franklin, "Effectiveness of Rehabilitation on Seismic Behavior of Masonry Piers", *Journal of Structural Engineering*, sv. 133, izd. 1, str. 32-43, 2007.
- [18] F. Parisi, C. Menna, i A. Prota, "Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) composites", u *Failure Analysis in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, Elsevier, str. 199-227, 2019.
- [19] M. Gams, M. Tomažević, i A. Kwiecień, "Strengthening Brick Masonry by Repointing - An Experimental Study", *Key Engineering Materials*, sv. 624, str. 444-452, 2014.
- [20] S. De Santis i G. de Felice, "Steel reinforced grout systems for the strengthening of masonry structures", *Composite Structures*, sv. 134, str. 533-548, 2015.
- [21] L. A. S. Kouris i T. C. Triantafillou, "State-of-the-art on strengthening of masonry structures with textile reinforced mortar (TRM)", *Construction and Building Materials*, sv. 188, str. 1221-1233, 2018.
- [22] J. R. Bean Popehn, A. E. Schultz, i C. R. Drake, "Behavior of Slender, Posttensioned Masonry Walls under Transverse Loading", *Journal of Structural Engineering*, sv. 133, izd. 11, str. 1541-1550, 2007.
- [23] L. Facconi, A. Conforti, F. Minelli, i G. A. Plizzari, "Improving shear strength of unreinforced masonry walls by nano-reinforced fibrous mortar coating", *Materials and Structures*, sv. 48, izd. 8, str. 2557-2574, 2015.
- [24] M. Shabdin, N. K. A. Attari, i M. Zargaran, "Experimental study on seismic behavior of Un-Reinforced Masonry (URM) brick walls strengthened with shotcrete", *Bulletin of Earthquake Engineering*, sv. 16, izd. 9, str. 3931-3956, 2018.

- [25] C. Wang, V. Sarhosis, i N. Nikitas, "Strengthening/Retrofitting Techniques on Unreinforced Masonry Structure/Element Subjected to Seismic Loads: A Literature Review", *The Open Construction and Building Technology Journal*, sv. 12, izd. 1, str. 251-268, 2018.
- [26] J. Galič, "Ojačanje zidanih stupova i zidova uporabom polimera armiranih vlaknima", doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zagreb, 2011.
- [27] M. Corradi, A. Di Schino, A. Borri, i R. Rufini, "A review of the use of stainless steel for masonry repair and reinforcement", *Construction and Building Materials*, sv. 181, str. 335-346, 2018.
- [28] G. M. A. Schreppers, A. Garofano, F. Messali, i J. G. Rots, "DIANA Validation report for Masonry modelling". DIANA FEA B.V., 2016.
- [29] M. Kržan, S. Gostič, S. Cattari, i V. Bosiljkov, "Acquiring reference parameters of masonry for the structural performance analysis of historical buildings", *Bulletin of Earthquake Engineering*, sv. 13, izd. 1, str. 203-236, 2015.
- [30] L. Albanesi, P. Morandi, F. Graziotti, T. L. Piani, A. Penna, i G. Magenes, "Lateral Strength of URM Piers: Comparison Between Codified Criteria and In-Plane Test Results", u *Proceedings of the International Masonry Society Conferences*, str. 1656-1667, 2018.
- [31] M. Y. Oña Vera, G. Metelli, J. A. O. Barros, i G. A. Plizzari, "Effectiveness of a steel ring-frame for the seismic strengthening of masonry walls with new openings", *Engineering Structures*, sv. 226, 111341, 2021.

IZVJEŠĆA O PROVEDENOM DODATNOM OBRAZOVANJU I USAVRŠAVANJU ZAPOSLENIKA

rujan 2025. - srpanj 2026.

“Mass Timber Seminar International 2025” u Cortacciji

Nikola Perković

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, nikola.perkovic@grad.unizg.hr

Sažetak

Cilj dodatnog usavršavanja “Mass Timber Seminar International 2025” bio je unaprijeđenje stručnog znanja o projektiranju konstrukcija od masivnog drva i hibridnih sustava drvo-čelik i drvo-beton. Usavršavanje je održano u organizaciji tvrtke Rothoblaas u Cortacciji (Italija), od 1. do 5. prosinca 2025. Program je obuhvatio hibridne čelično-drvene stropne konstrukcije, protupotresno projektiranje hibridnih drvo-čeličnih sustava, hibridne drvo-betonske konstrukcije te požarnu otpornost hibridnih spojeva, uz poseban naglasak na prefabricirane drvene fasade kao ključan čimbenik kvalitete i brzine izvedbe. Stečen je uvid u najnovije trendove, materijale i tehnologije montaže u europskoj drvenoj gradnji te ostvareno umrežavanje s inženjerima, arhitektima i proizvođačima iz cijeloga svijeta. Znanja će se izravno primijeniti u projektiranju građevina s nosivim sustavima od masivnog drva i hibridnih rješenja drvo-čelik/drvo-beton, uz podizanje razine sigurnosti u pogledu seizmičkog i požarnog projektiranja.

Ključne riječi: masivno drvo, hibridne konstrukcije drvo-čelik, hibridne konstrukcije drvo-beton, protupotresno projektiranje, požarna otpornost

“Mass Timber Seminar International 2025” in Cortaccia

Abstract

The goal of the additional training “Mass Timber Seminar International 2025” was to advance professional knowledge on the design of mass timber structures and hybrid timber-steel and timber-concrete systems. The training was organized by Rothoblaas in Cortaccia (Italy), from 1 to 5 December 2025. The programme covered hybrid steel-timber flooring solutions, seismic design of hybrid timber-steel structures, hybrid timber-concrete structures, and fire design of hybrid connections, with particular emphasis on prefabricated timber facades as a key factor for quality and speed of execution. Insight was gained into the latest trends, materials, and assembly technologies in European timber construction, alongside networking with engineers, architects, and manufacturers worldwide. The knowledge gained will be applied directly in the design of buildings with mass-timber and hybrid timber-steel/timber-concrete load-bearing systems, raising the level of seismic and fire safety.

Key words: mass timber, timber-steel hybrid structures, timber-concrete hybrid structures, seismic design, fire design

“6th Infrastar Training School on Fatigue and Reliability Analysis of Structures - Training for Assessment of Risk” u Nantes-u

Bruno Zadravec

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, bruno.zadravec@grad.unizg.hr

Sažetak

Na radionici “6th Infrastar Training School on Fatigue and Reliability”, održanoj od 24. do 27. studenoga 2025., obrađene su teme vezane uz zamor materijala i pouzdanost konstrukcija. Program je bio organiziran u tri cjeline: metode monitoringa i procjene zamora konstrukcija, modeliranje dugotrajnog ponašanja konstrukcija pod djelovanjem različitih opterećenja te procjena rizika i pouzdanosti konstrukcija tijekom njihova uporabnog vijeka. Tijekom radionice predstavljene su suvremene metode za modeliranje dugotrajnih djelovanja i procjenu njihovog utjecaja na ponašanje konstrukcija, uz poseban naglasak na razvoj numeričkih modela koji omogućuju realističan prikaz ponašanja konstrukcija tijekom vremena. Također su obrađeni postupci procjene rizika i određivanja pouzdanosti konstrukcija u različitim fazama njihova životnog vijeka. Stečena znanja izravno su primjenjiva u području istraživanja drvenih konstrukcija, s obzirom na to da je drvo kao konstruktivni materijal podložno zamoru uslijed dugotrajnog djelovanja opterećenja i utjecaja okolišnih čimbenika. Primjena usvojenih metoda omogućit će kvalitetnije modeliranje dugotrajnog ponašanja drvenih elemenata te unaprijediti analizu utjecaja različitih vrsta opterećenja u proračunu i razvoju konstrukcijskih rješenja.

Ključne riječi: zamor konstrukcija, pouzdanost konstrukcija, dugotrajno ponašanje konstrukcija, numeričko modeliranje, drvene konstrukcije

“6th Infrastar Training School on Fatigue and Reliability Analysis of Structures - Training for Assessment of Risk” in Nantes

Abstract

The 6th Infrastar Training School on Fatigue and Reliability, held from 24 to 27 November 2025, focused on fatigue assessment and structural reliability. The programme was organized into three main topics: monitoring and assessment of structural fatigue, modelling the long-term behaviour of structures under various loading conditions, and evaluating structural risk and reliability throughout the service life of structures. The training school presented state-of-the-art methods for modelling long-term actions and assessing their influence on structural behaviour, with particular emphasis on the development of numerical models capable of realistically representing structural performance over time. In addition, methodologies for risk assessment and structural reliability evaluation throughout the life cycle of engineering structures were discussed. The knowledge gained is directly applicable to research on timber structures, as timber is susceptible to fatigue under long-term loading and environmental influences. The presented approaches provide a valuable basis for improving the modelling of long-term behaviour of timber structural elements and for enhancing the assessment of different loading scenarios in structural analysis and design.

Key words: structural fatigue, structural reliability, long-term behaviour, numerical modelling, timber structures

“Generating Functions, Applications of the theory of inequalities and related areas” na Sveučilištu Akdeniz, Antalija

Dora Pokaz

Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, dora.pokaz@grad.unizg.hr

Sažetak

Cilj dodatnog usavršavanja usko je povezan s mojim znanstvenim radom s jedne strane i dugoročnim ciljem unapređenja kvalitete nastave matematike na Sveučilištu u Zagrebu Građevinskom fakultetu s druge strane. Program usavršavanja bio je usmjeren na suvremene istraživačke teme iz područja teorije nejednakosti i njihovih primjena, koje predstavljaju važan dio mog znanstvenog interesa. Sudjelovanje na ovom usavršavanju omogućilo mi je stjecanje novih znanja o aktualnim istraživačkim smjerovima, metodama rada i suvremenim pristupima u matematičkim istraživanjima. Boravak na Sveučilištu Akdeniz pružio mi je priliku za intenzivnu razmjenu iskustava s kolegama sa Sveučilišta Akdeniz, kao i s istraživačima s drugih inozemnih sveučilišta koji su sudjelovali u programu usavršavanja. Kroz stručne rasprave, predavanja i zajednički rad upoznala sam različite pristupe istraživanju i poučavanju matematike te stekla uvid u primjere dobre prakse u organizaciji nastave. Sudjelovanje na ovom programu dodatno je učvrstilo postojeću suradnju između Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta i Sveučilišta Akdeniz te otvorilo mogućnosti za razvoj novih zajedničkih istraživačkih projekata. Takva suradnja doprinosi internacionalizaciji obje institucije, razvoju novih znanstvenih inicijativa te jačanju međunarodne prepoznatljivosti istraživačkog rada i nastavnih aktivnosti.

Gljučne riječi: matematičke nejednakosti, modernizacija nastave matematike

“Generating Functions, Applications of the theory of inequalities and related areas” at Akdeniz University, Antalya

Abstract

The purpose of this professional development activity was closely related to my research interests and to the long-term goal of improving the quality of mathematics education at the University of Zagreb Faculty of Civil Engineering. The training programme focused on contemporary research topics in the theory of inequalities and their applications, which represent an important part of my research. Participation in this programme enabled me to deepen my knowledge of current research trends, methodologies, and modern approaches in mathematical research, thereby contributing to the further development of my scientific work. My stay at Akdeniz University provided an excellent opportunity to exchange knowledge and experience with colleagues from Akdeniz University and researchers from other international universities participating in the programme. Through lectures, scientific discussions, and collaborative work, I became familiar with different approaches to mathematical research and teaching and gained insight into examples of good practice in higher education. Participation in this programme further strengthened the existing cooperation between the University of Zagreb Faculty of Civil Engineering and Akdeniz University. It also opened opportunities for the development of new joint research projects. Such cooperation contributes to the internationalisation of both institutions, the development of new scientific initiatives, and the enhancement of the international visibility of research and teaching activities.

Key words: mathematical inequalities, modernisation of mathematics teaching

“HiMASS Summer School 2025 – Heritage Masonry: Materials, Analysis and Structural Safety” u Oristanu, Sardinija

Elizabeta Šamec

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, esamec@grad.hr

Sažetak

Cilj dodatnoga usavršavanja stjecanje je znanja iz područja analize, procjene i obnove povijesnih zidanih konstrukcija. Program je obuhvatio predavanja međunarodno priznatih stručnjaka iz područja mehanike zida, eksperimentalnih ispitivanja, numeričkoga modeliranja te procjene seizmičke otpornosti kulturne baštine. Naglasak stavljen je na razumijevanje ponašanja povijesnih zidanih konstrukcija, metode dijagnostike te primjenu tradicionalnih i suvremenih metoda u analizi i projektiranju mjera ojačanja. Poseban dio usavršavanja odnosio se na rad u multidisciplinarnim timovima na primjerima povijesnih zidanih građevina iz okolice, pri čemu smo primjenjivali stečena znanja na procjenu postojećega stanja, analizu ponašanja i izradu prijedloga mjera obnove. Rezultati rada predstavljeni su međunarodnim stručnjacima koji su pružili detaljne povratne informacije i komentare na predložene analize i rješenja, čime je omogućena razmjena iskustava i kritičko vrednovanje različitih pristupa obnovi kulturne baštine.

Gljučne riječi: povijesne zidane konstrukcije, kulturna baština, seizmička otpornost, numeričko modeliranje, obnova građevina

“HiMASS Summer School 2025 – Heritage Masonry: Materials, Analysis and Structural Safety” in Oristano, Sardinia

Abstract

The objective of the additional training was to acquire knowledge in the analysis, assessment, and restoration of historic masonry structures. The programme included lectures delivered by internationally recognised experts in masonry mechanics, experimental testing, numerical modelling, and the seismic assessment of cultural heritage. Particular emphasis was placed on understanding the behaviour of historic masonry structures, diagnostic methods, and the application of both traditional and modern approaches to structural analysis and the design of strengthening interventions. A significant part of the training was dedicated to multidisciplinary teamwork on case studies involving historic masonry structures from the surrounding region. Participants applied the knowledge acquired during the lectures to assess the existing condition of the structures, analyse their structural behaviour, and develop rehabilitation proposals. The results were presented to internationally recognised experts, who provided detailed feedback and comments on the proposed analyses and intervention strategies, fostering the exchange of experience and the critical evaluation of different approaches to the conservation and rehabilitation of cultural heritage.

Key words: historic masonry structures, cultural heritage, seismic assessment, numerical modelling, structural rehabilitation

“EUROCORR 2025 – Corrosion Summer School” u Stavangeru, Norveška

Katarina Vranešić

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, katarina.vranesic@grad.unizg.hr

Sažetak

EFC Corrosion Summer School “Corrosion Failure Analysis, Monitoring and Maintenance” održana je od 4. do 6. rujna 2025. na Sveučilištu u Stavangeru u Norveškoj, u sklopu programa EuroCorr 2025, u organizaciji Europske federacije za koroziju. Ljetna je škola namijenjena doktorandima, poslijedoktorandima i inženjerima čiji je znanstveni i stručni rad usmjeren na analizu i sprječavanje korozijskih procesa na konstrukcijama, a obuhvaćala je predavanja vrhunskih stručnjaka iz akademije i industrije, terenske posjete laboratorijima i realnim postrojenjima, kao i predstavljanje primjera specifičnih korozijskih oštećenja s kojima su se inženjeri susreli u praksi. Sudjelovanje na ljetnoj školi omogućilo je sudionicima stjecanje interdisciplinarnog znanja primjenjivog na procjenu stanja i održavanje građevinske i industrijske infrastrukture kada je riječ o korozijskim procesima, razmjeni iskustava s međunarodnim stručnjacima te umrežavanje korisno za daljnji akademski i profesionalni razvoj. Osim dodatnog obrazovanja, tijekom sudjelovanja na radionici održano je nekoliko sastanaka sa sudionicima, a tema sastanaka je bila mogućnost buduće suradnje kroz znanstvena istraživanja.

Ključne riječi: korozija, korozijski monitoring, održavanje infrastrukture, ljetna škola

“EUROCORR 2025 – Corrosion Summer School” in Stavanger, Norway

Abstract

The EFC Corrosion Summer School, “Corrosion Failure Analysis, Monitoring and Maintenance,” was held from 4 to 6 September 2025 at the University of Stavanger, Norway, as part of the EuroCorr 2025 program organized by the European Federation of Corrosion. The summer school was intended for PhD students, postdoctoral researchers, and engineers whose scientific and professional work focuses on the analysis and prevention of corrosion processes in engineering structures. The program included lectures by leading experts from academia and industry, technical visits to laboratories and operational industrial facilities, and presentations of specific corrosion damage cases encountered by engineers in practice. Participation in the summer school enabled attendees to acquire interdisciplinary knowledge applicable to the condition assessment and maintenance of civil and industrial infrastructure affected by corrosion processes, exchange experiences with international experts, and establish professional networks beneficial for their future academic and professional development. In addition to the educational program, several meetings were held with other participants during the workshop to discuss opportunities for future collaboration on scientific research projects.

Key words: corrosion, corrosion monitoring, infrastructure maintenance, summer school

„Sustainable Project Management Training Session“ u Milanu

Kristijan Robert Prebanić

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, kristijan.robert.prebanic@grad.unizg.hr

Sažetak

Globalni izazovi 21. stoljeća, kao što su klimatske promjene, oskudica različitih resursa i sve veća društvena nejednakost, zahtijevaju novi pristup vođenju građevinskih projekata, onaj koji uključuje ESG principe održivosti (okolišne, društvene i upravljačke). Cilj ovog intenzivnog trodnevnog treninga je stjecanje dodatnih vještina i kompetencija za uključivanje održivosti u vođenje (građevinskih) projekata. Kroz intenzivnu trodnevnu radionicu obrađuju se trenutno aktualne teme iz područja održivog upravljanja projektima, kao što su: održivost u globalnom kontekstu, održivost i odgovornost u organizacijama, uloga projekata u održivom razvoju, održivost u definiranju projekata, provedba analize utjecaja projekta na održivost okoline i poduzeća, usklađenost sa strategijom organizacije te održivost u isporuci projekata. Konačni rezultat treninga je osposobiti polaznike da mogu provesti usklađivanje svojih (građevinskih) projekata s ciljevima održivosti i da znaju primijeniti principe održivosti kroz sve faze projekta, od koncipiranja i projektiranja pa sve do kreiranja konačnog plana održive uporabe i održavanja objekata koji su nastali kao rezultat projekta.

Ključne riječi: održivost, održivo upravljanje projektima, ESG principi, održivi građevinski projekti

“Sustainable Project Management Training Session” in Milan

Abstract

The global challenges of the 21st century, such as climate change, resource scarcity, and growing social inequality, require a new approach to managing construction projects—one that integrates Environmental, Social, and Governance (ESG) sustainability principles. The aim of this intensive three-day training programme is to equip participants with the knowledge, skills, and competencies needed to integrate sustainability into (construction) project management. Through an intensive three-day workshop, participants explore current topics in sustainable project management, including sustainability in the global context, sustainability and corporate responsibility, the role of projects in sustainable development, sustainability in project definition, conducting project sustainability impact assessments, alignment with organisational strategy, and sustainability in project delivery. The ultimate objective of the training is to enable participants to align their (construction) projects with sustainability goals and to apply sustainability principles throughout the entire project lifecycle—from project conception and design to the development of a long-term sustainable operation and maintenance plan for the assets delivered by the project.

Key words: sustainability, sustainable project management, esg principles, sustainable construction projects

SAŽECI OBRANJENIH DOKTORSKIH RADOVA

rujan 2025. - srpanj 2026.

Sažeci obranjenih doktorskih radova u razdoblju rujan 2025. – srpanj 2026.

NASLOV DISERTACIJE / AUTOR	Str.
2025. godina	
Istraživanje ponašanja okvira od armiranoga betona s nadograđenim katom, s naglaskom na spoj između nadogradnje i postojeće konstrukcije pod seizmičkim opterećenjem dr. sc. Alush Shala	150
Pouzdanost spregnutoga međukatnoga sustava čelik-beton izvedenoga od hladno oblikovanih sastavljenih čeličnih elemenata dr. sc. Andrea Rajić	151
Pouzdanost posmične veze kod spregnutog sustava izvedenog od hladno oblikovanog čelika i betona dr. sc. Vlaho Žuvelek	152
Procjena pouzdanosti uzdužno zavarenih aluminijskih elemenata izloženih osnom tlaku dr. sc. Ivan Čudina	153
Doprinos vjetra izmjeni mora u marini s ugrađenim propustima u tijelu lukobrana dr. sc. Ivana Lovrić	154
Ekspertni sustav podrške za izračun isplativosti izgradnje postrojenja za solarno sušenje mulja dr. sc. Emir Zekić	155
Mehaničko-empirijski model pogoršanja geometrije uskotračnoga kolosijeka u ovisnosti o brzini tramvaja dr. sc. Igor Majstorović	156
2026. godina	
Utjecaj ciljanih ojačanja na modele oštećljivosti tipičnih zidanih stambenih zgrada dr. sc. Ante Pilipović	157
Ponašanje mikroarmiranog morta visokih uporabnih svojstava u ranoj starosti dr. sc. Katarina Didulica	158
Utjecaj podmorskoga praga na morfodinamiku žala umjetnih plaža dr. sc. Hanna Miličević	159
Razvoj metodologije za integraciju ekoloških i ekonomskih kriterija u cilju unapređenja održivosti armiranobetonskih mostova u morskome okolišu dr. sc. Ivana Milić	160
Mogućnosti primjene pepela suncokretove ljuske kao alternativnog aktivatora za alkalnoaktivirane materijale na bazi zgure dr. sc. Olivera Bedov	161

dr. sc. Alush Shala

Životopis

Rođen je 1975. u Mušitištu u Republici Kosovu. Diplomirao je 2004. s magistarskim stupnjem iz građevinarstva. Od travnja 2004. do 2006. radio je kao voditelj projekta u tvrtki Çlirimi L. L. C., a od 2006. do 2009. u tvrtki XH.Kololli. Od 2009. zaposlen je kao inženjer za projektiranje konstrukcija i viši menadžer u tvrtki Alb-Architect L. L. C. u Prištini, gdje je uključen u projektiranje, nadzor, znanstvene i stručne aktivnosti. Sudjelovao je u procjeni stabilnosti građevina pogođenih potresom u Albaniji, kao i u evaluaciji stabilnosti nekoliko vertikalno nadograđenih građevina na Kosovu. Od 2019. autor je i koautor devet znanstvenih radova. U rujnu 2025. obranio je doktorski rad na Sveučilištu u Zagrebu na Građevinskom fakultetu.

Mentori: doc. dr. sc. **Jelena Bleiziffer**
izv.prof. dr. sc. **Arton Dautaj**

Datum obrane: 11.8. 2025.

Naslov doktorskog rada

Istraživanje ponašanja okvira od armiranoga betona s nadograđenim katom, s naglaskom na spoj između nadogradnje i postojeće konstrukcije pod seizmičkim opterećenjem

Sažetak

U radu je istražena vertikalna nadogradnja armiranobetonskih okvirnih konstrukcija, praksa koja je široko rasprostranjena u zemlji autora, ali i u svijetu. S obzirom na to da je u regiji prisutan inherentni seizmički rizik, ključno je konstrukcijsko razmatranje takvih nadogradnji, s fokusom na ponašanje spojeva i njihova utjecaja na ponašanje i sigurnost čitave konstrukcije. Stoga su ključni ciljevi bili analiza spoja starog i novog betonskog sklopa u vertikalnoj nadogradnji, usporedba krutosti spoja na nizu modela pri potresnom djelovanju, određivanje koeficijenta krutosti odnosno ponašanja spoja, ocjena njegove nosivosti te utvrđivanje prednosti i nedostataka razmatranih modela. Istraživanjem je obuhvaćen pregled relevantne literature, uključujući trenutačne norme, pripremu uzoraka za ispitivanje, rješavanje i proračun okvirne konstrukcije stvarnih izmjera te zatim pripremu i izradu umanjenih modela okvira, slijedeći postupke sidrenja na ispitanim uzorcima za prikladnu simulaciju vertikalne nadogradnje dvokatnog okvira dodatnom etažom. Modeli su ispitani kvazistatičkim cikličnim opterećivanjem prema utvrđenom protokolu. Zaključeno je da se spojevi ne ponašaju kao kruti te da se nadograđeni okvir ne ponaša kao monolitni betonski okvir pri potresnom djelovanju. Utvrđen je koeficijent krutosti $k = 0,75\text{--}0,8$ za nadogradnju s detaljima sukladnim normama, a $k = 0,5\text{--}0,6$ za nadogradnju s detaljima uobičajenim u praksi.

dr. sc. Andrea Rajić

Životopis

Rođena je 1998. u Zagrebu, gdje je završila osnovnu školu (2012.) i XV. gimnaziju. Godine 2016. upisala se na prijediplomski sveučilišni studij na Sveučilištu u Zagrebu na Građevinskom fakultetu te je u rujnu 2019. stekla akademski naziv prvostupnice građevinarstva. Na tom je fakultetu u rujnu 2021. završila diplomski studij, smjer konstrukcije. Za akademsku godinu 2020./2021. dodijeljena joj je Rektorova nagrada za individualni znanstveni rad. U listopadu 2021. na Građevinskom se fakultetu upisala i na doktorski studij Građevinarstvo, smjer Konstrukcije, te je 2025. obranila doktorski rad.

Mentor: izv.prof. dr. sc. **Ivan Lukačević**

Datum obrane: 18.9.2025.

Naslov dokorskog rada

Pouzdanost spregnutoga međukatnoga sustava čelik-beton izvedenoga od hladno oblikovanih sastavljenih čeličnih elemenata

Sažetak

Zbog potreba tržišta za održivom gradnjom i smanjenom potrošnjom materijala, ovaj rad istražuje inovativni spregnuti sustav međukatnih konstrukcija izrađenog od sastavljenih hladno oblikovanih čeličnih elemenata u kombinaciji s lakoagregatnim betonom. Zajedničko djelovanje sustava postiže se pomoću demontažnog posmičnog spoja, dok su hladno oblikovani čelični elementi međusobno povezani točkastim zavarivanjem, što omogućuje automatiziranu proizvodnju. Primjena demontažnih posmičnih sredstava omogućuje učinkovit prijenos opterećenja te jednostavniju demontažu i recikliranje na kraju životnog vijeka konstrukcije. To vodi prema kružnoj praksi u građevinarstvu. Unatoč potencijalnim prednostima, postojeće norme ne predviđaju standardizirane postupke proračuna za ovu vrstu spregnutog sustava međukatnih konstrukcija. Cilj ovog istraživanja je razviti pouzdanu metodologiju proračuna međukatnih konstrukcija izloženih momentima savijanja i poprečnim silama prilagodbom postojećih postupaka proračuna. Metodologija se sastoji od analitičkog, numeričkog i probabilističkog pristupa, koji su potvrđeni laboratorijskim ispitivanjima materijala, pojedinih komponenti i cijelog sustava. Rezultati ovog istraživanja imaju za cilj podržati buduću primjenu spregnutih sustava od hladno oblikovanog čelika i betona u praktičnom inženjerstvu te unaprijediti održive građevinske tehnologije.

dr. sc. Vlaho Žuvelek

Životopis

Rođen je 1997. u Dubrovniku, gdje je završio osnovnu školu i matematičku gimnaziju. Godine 2016. upisao se na Sveučilište u Zagrebu na Građevinski fakultet, na kojem je 2021. diplomirao završivši sveučilišni diplomski studij smjera Konstrukcije te stekao akademski naziv magistra inženjera građevinarstva. Na tom je fakultetu 2025. obranio doktorski rad, a od 2021. do 2025. radio je kao asistent i sudjelovao na znanstvenom projektu LWT-FLOOR Project. Od 2025. zaposlen je kao projektant u projektantskom uredu Stabilnost d. o. o. Objavio je više znanstvenih i stručnih radova te sudjelovao na konferencijama u Hrvatskoj i inozemstvu. Aktivno govori engleski jezik.

Mentor: izv. prof. dr. sc. **Ivan Ćurković**

Datum obrane: 18.9. 2025.

Naslov doktorskog rada

Pouzdanost posmične veze kod spregnutoga sustava izvedenoga od hladno oblikovanoga čelika i betona

Sažetak

Rastuća svijest o okolišu potaknula je interes za održivim sustavima gradnje koji poboljšavaju učinkovitost konstrukcije i ekološku odgovornost. Spregnuti sustavi od hladno oblikovanog (HO) čelika i betona obećavajuća su rješenja, pružajući učinkovitost i smanjenu potrošnju materijala. Nadalje, vijčana posmična sredstva ističu se kao rješenje koje omogućuje demontažu i ponovnu upotrebu konstrukcijskih elemenata. Stoga, ova disertacija usmjerena je na istraživanje ponašanja vijčane posmične veze u inovativnom sustavu LWT-FLOOR, koji se sastoji od sastavljene HO čelične grede (C-profilu kao pojasnice, valoviti lim kao hrbat spojen točkastim zavarima) i betonske ploče s demontažnom vijčanom posmičnom vezom. Rad obuhvaća 18 uzoraka na kojima je provedeno normirano ispitivanje guranjem: šest uzoraka se sastoji od sastavljenih HO čeličnih nosača bez valovitog hrpta, dok preostalih dvanaest uključuje sastavljene HO čelične nosače s valovitim hrptom. Svi uzorci imaju vijčana posmična sredstva u profiliranim armiranim pločama. Kalibrirani model konačnih elemenata obuhvaća parametarsku analizu uključujući kvalitetu i debljinu HO čelični profila, geometriju i kvalitetu vijaka, vrstu i čvrstoća betona te geometriju profiliranog lima. Rezultati pokazuju složeno ponašanje s višestrukim načinima otkazivanja i osjetljivost na geometrijske i materijalne karakteristike. Pouzdanost razvijenog modela potvrđena je probabilističkom analizom, kojom je pokazana njegova primjenjivost prilikom proračuna otpornosti vijčane posmične veze.

dr. sc. Ivan Čudina

Životopis

Rođen je 1993. u Splitu, gdje je završio osnovnoškolsko i srednjoškolsko, gimnazijsko obrazovanje. Godine 2012. upisao se na studij na Sveučilištu u Zagrebu na Građevinskom fakultetu, na kojem je 2017. godine diplomirao. Od siječnja 2018. do studenoga 2019. radio je kao projektant suradnik. Od prosinca 2019. radi kao asistent na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, gdje sudjeluje u provedbi nastavne, znanstvene i stručne djelatnosti. Doktorski rad obranio je u listopadu 2025. godine.

Mentor: prof. dr. sc. **Davor Skejić**

Datum obrane: 20.10.2025.

Naslov dokorskog rada

Procjena pouzdanosti uzdužno zavarenih aluminijskih elemenata izloženih osnom tlaku

Sažetak

Zbog niske specifične težina i otpornost na koroziju, upotreba aluminijskih legura u konstrukcijskoj primjeni je u porastu. Aluminijski elementi se uglavnom proizvode procesom istiskivanja koji omogućava široku paletu oblika poprečnih presjeka, ali uvodi ograničenja dimenzija poprečnih presjeka. Elementi većih poprečnih presjeka se mogu zavariti. Zbog poteškoća koje se vezuju uz zavarivanje aluminijskih legura, uzdužno zavareni aluminijski elementi imaju ograničenu i zastarjelu eksperimentalnu pozadinu. Ovaj rad predstavlja rezultate eksperimentalnog istraživanja nadopunjenog numeričkim analizama i procjenama pouzdanosti provedenih s ciljem evaluacije proračunskih postupaka danih u Eurokodu 9 za uzdužno zavarene tlačne elemente. Istraživanje je obuhvatilo dvije aluminijske legure, tri debljine limova i dva postupka zavarivanja. Ukupno su izrađena 24 sučeono zavarena spoja, 24 kutno zavarena T-spoja te 32 uzdužno zavarena uzorka stupova s jednolikim i 8 s promjenjivim poprečnim presjekom. Mjerenja tvrdoće su pokazala da je opseg rasprostiranja zone utjecaja topline konzistentno manji u odnosu na vrijednosti normirane u Eurokodu 9. Rezultati vlačnih ispitivanja su pokazali da su izmjerene redukcije mehaničkih svojstava unutar te zone u dobrom poklapanju s normiranim vrijednostima. Evaluacija Eurokoda 9 je pokazala da norma podcjenjuje realne otpornosti uzdužno zavarenih elemenata na izvijanjem savijanjem. Modifikacije proračunskog postupka su predložene kojima se povećala razina točnosti uz postizanje zadovoljavajuće razine pouzdanosti.

dr. sc. Ivana Lovrić

Životopis

Rođena je u Zagrebu. Diplomirala je 2013. na Sveučilištu u Zagrebu na Građevinskom fakultetu, na kojem je 2025. obranila doktorski rad. Akademске godine 2011./2012. dobila je Rektorovu nagradu. Od 2013. do 2014. radila je kao vježbenica u Gradu Zagrebu, Gradskom uredu za prostorno planiranje. Od 2014. radi na Graditeljskom odjelu Tehničkoga veleučilišta u Zagrebu u suradničkom zvanju asistentice, od 2018. na radnom mjestu predavačice te od 2023. do danas na radnom mjestu više predavačice, gdje sudjeluje u nastavnim, znanstvenim i stručnim poslovima. Objavila je više znanstvenih i stručnih radova te sudjelovala na konferencijama u Hrvatskoj i inozemstvu. Govori engleski jezik.

Mentor: prof. dr. sc. **Goran Lončar**

Datum obrane: 31.10.2025.

Naslov doktorskog rada

Doprinos vjetra izmjeni mora u marini s ugrađenim propustima u tijelu lukobrana

Sažetak

Izmjena mora između marine i okolnog akvatorija ovisi o geometrijskom oblikovanju marine i djelovanju prirodnih generatora cirkulacije. U područjima s malim plimnim oscilacijama izmjena mora često nije zadovoljavajuća, pa vjetar može doprinijeti izmjeni mora. Kao dodatnu mjeru za poboljšanje izmjene mora moguće je ugraditi propuste u tijelo lukobrana. Terenska mjerenja provedena su u ACI marini Opatija koja ima ugrađene cijevne propuste u lukobranu. Dobiveni rezultati su poslužili za izradu numeričkog modela pomoću kojeg su kvantificirani dominantni generatori izmjene mora. Na modelu hipotetske marine provedena je analiza utjecaja varijacije generatora strujanja i tlocrtne pozicije propusta na izmjenu mora. Na temelju rezultata predložena je unaprijeđena matematička formulacija za kvantifikaciju doprinosa karakterističnih smjerova vjetra na vrijeme zadržavanja T_f . Propusti s odnosom površina propusta i ulaza 0,02–0,04 imaju mali doprinos ukupnoj izmjeni mora, dok širina ulaza ima primarnu ulogu. Širi ulaz pogoduje izmjeni kod vjetrom generiranih strujanja, a uža kod plimnih oscilacija. U kraćim razdobljima vjetar može biti dominantan, dok su u dužima prevladavaju plimne oscilacije. Najpovoljniji položaj propusta, za marinu s bočnim ulazom, je nasuprot ulaza u marinu. Doprinos vjetra na vrijeme zadržavanja T_f ovisi o brzini, smjeru i jačini vjetra, površini ulaza i propusta, površini i volumenu marine, a može se kvantificirati za karakteristične smjerove vjetra kroz unaprijeđenu matematičku formulaciju.

dr. sc. Emir Zekić

Životopis

Rođen je 1984. u Dubrovniku, gdje je završio osnovnu školu i matematičku gimnaziju. Godine 2002. upisao se na Sveučilište u Zagrebu na Građevinski fakultet, na kojem je 2008. diplomirao završivši sveučilišni diplomski studij, usmjerenje Hidrotehnika. Od veljače 2009. do lipnja 2012. bio je zaposlen u Institutu IGH d. d., a od lipnja 2012. do prosinca 2024. bio je direktor u tvrtki Hidrokon d. o. o. Od prosinca 2024. zaposlen je u tvrtki Hidronova d. o. o., čiji je vlasnik i direktor. Od 2009. godine sudjeluje u izradi niza stručnih poslova, od idejnih do glavnih i izvedbenih projekata, na području projektiranja hidrotehničkih građevina i infrastrukture.

Mentor: prof. dr. sc. **Dražen Vouk**

Datum obrane: 15.12.2025.

Naslov doktorskog rada

Ekspertni sustav podrške za izračun isplativosti izgradnje postrojenja za solarno sušenje mulja

Sažetak

U ovom radu razmatra se ekonomski aspekt izgradnje postrojenja za solarno sušenje mulja. Izrađen je ekspertni sustav temeljen na neuralnim mrežama kojim se, uvažavajući sve utjecajne parametre i rubne uvjete, može izračunati isplativost izgradnje postrojenja za solarno sušenje mulja u odnosu na ostala varijantna rješenja. U tu svrhu korišten je programski paket NeuralTools. Za potrebe izrade baze podataka analizirane su dvije varijante zbrinjavanja mulja: obrada mulja u regionalnom centru i predaja mulja drugoj pravnoj osobi na zbrinjavanje. Kod varijante zbrinjavanja mulja u regionalnom centru razmatrane su dodatne opcije: prijevoz mulja do regionalnog centra vlastitim vozilima javnih isporučitelja vodnih usluga i angažman vanjske tvrtke za prijevoz. Ukupno je napravljeno pet modela neuralne mreže. Varijanta s obradom mulja u regionalnom centru se zbog velikog broja scenarija podijelila u četiri manje neuralne mreže grupirane u ovisnosti o ulaznom opterećenju i s obzirom na način prijevoza. Peta neuralna mreža odnosila se na varijantu predaje mulja drugoj pravnoj osobi na zbrinjavanje. Svaka od prve četiri varijante rezultirala je s bazom od 149,760 scenarija. Peta varijanta rezultirala je bazom od 74,881 scenarija. Kao izlazna varijabla u treniranju neuralne mreže definirana je neto sadašnja vrijednost (NSV) ukupnih troškova izgradnje, pogona, održavanja, amortizacije i zbrinjavanja mulja u periodu od 30 godina. Rezultati testiranja svih treniranih neuralnih mreža pokazali su se izrazito točnima s greškom manjom od 5%.

dr. sc. Igor Majstorović

Životopis

Rođen je 1978. u Zagrebu. Diplomirao je 2005. godine na Sveučilištu u Zagrebu na Građevinskom fakultetu, na kojem je 2025. obranio doktorski rad. Od lipnja 2004. radi na tom fakultetu, prvo kao student, a od završetka studija kao stručni suradnik, gdje sudjeluje u stručnim i znanstvenim poslovima. Sudjelovao je u izradi niza stručnih poslova, od studija i strateških dokumenata preko idejnih rješenja do idejnih, glavnih i izvedbenih projekata, na području planiranja i projektiranja prometne infrastrukture, te je objavio niz znanstvenih i stručnih radova u koautorstvu.

Mentorica: izv. prof. dr. sc. **Maja Ahac**

Datum obrane: 19.12.2025.

Naslov doktorskog rada

Mehaničko-empirijski model pogoršanja geometrije uskotračnoga kolosijeka u ovisnosti o brzini tramvaja

Sažetak

Geometrija kolosijeka definira prostorni položaj tračnica u kolosijeku te izravno utječe na stabilnost vozila, sigurnost i učinkovitost prometa. Njezino pogoršanje, uzrokovano ponajprije dinamičkim opterećenjima, jedan je od ključnih čimbenika pogoršanja prometne infrastrukture, a ovisi o nizu međusobno povezanih čimbenika poput intenziteta eksploatacije, zakrivljenosti trase, vrste kolosiječne konstrukcije i položaja kolosijeka u prometnom koridoru. Dosadašnja istraživanja pogoršanja geometrije kolosijeka uglavnom su bila usmjerena na željezničke kolosijeke standardne širine (1435mm), zbog čega njihovi rezultati nisu u potpunosti primjenjivi na uskotračne tramvajske sustave. Stoga je cilj ovog istraživanja bio razviti mehaničko-empirijske modele promjene pet parametara geometrije uskotračnog tramvajskog kolosijeka u ovisnosti o intenzitetu eksploatacije i brzini tramvaja. Istraživanje je provedeno na zagrebačkom tramvajskom sustavu, koji se zbog heterogene konstrukcije kolosijeka, raznolikog voznog parka i visokog intenziteta eksploatacije pokazao kao idealan poligon za razvoj i testiranje novih modela degradacije geometrije uskotračnih tramvajskih kolosijeka. Rezultati pokazuju da na promjenu širine kolosijeka prvenstveno dijeluje intenzitet eksploatacije, dok brzina ima slabiji, ali statistički značajan utjecaj. Glavni doprinos rada jest razvoj mehaničko-empirijskih modela za predviđanje promjena širine uskotračnog tramvajskog kolosijeka kao funkcije intenziteta eksploatacije i brzine tramvajskih vozila.

dr. sc. Ante Pilipović

Životopis

Rođen je 1993. u Zagrebu. Diplomirao je na Sveučilištu u Zagrebu Građevinskom fakultetu 2017. iz stabilnosti konstrukcija. Nakon rada u struci kao inženjer na gradilištu i BIM upravitelj informacija, obranio je doktorski rad u području potresnog inženjerstva i rizika 2026. na istom Fakultetu, gdje nastavlja raditi kao poslijedoktorand. Završio je dvomjesečno znanstveno usavršavanje na Sveučilištu u Genovi kroz stipendiju Hrvatske zaklade za znanost. Temeljni je član Hrvatskog centra za potresno inženjerstvo – interventna služba, te je sudjelovao u domaćim i međunarodnim misijama traganja i spašavanja. Njegovo primarno područje istraživanja je potresno inženjerstvo s naglaskom na rizik od potresa, gdje je objavio niz radova.

Mentor: izv. prof. dr. sc. **Mario Uroš**

Datum obrane: 13.3.2026.

Naslov dokorskog rada

Utjecaj ciljanih ojačanja na modele oštetljivosti tipičnih zidanih stambenih zgrada

Sažetak

Potresno ojačanje zgrada od neomeđenog ziđa postalo je ključno pitanje u Hrvatskoj nakon potresa u Zagrebu i Petrinji 2020. Umjesto reaktivne cjelovite obnove, predlaže se preventivno ciljano ojačanje samo kritičnih konstrukcijskih elemenata radi ublažavanja glavnog mehanizma sloma. Takva rješenja smanjuju oštetljivost, ali ostala je upitna opravdanost u pogledu rizika i gubitaka. Predlaže se probabilistički okvir za interpretaciju nelinearnih dinamičkih analiza za utvrđivanje kritičnih elemenata, mehanizama sloma i optimalnih ciljanih ojačanja. Oštećenja se raščlanjuju na više razina kako bi se odredili kritični smjerovi, zidovi, etaže i elementi. Uveden je novi Indeks ciljanog ojačanja za ocjenu učinkovitosti ojačanja s obzirom na fizičku oštetljivost. Metodologija je primijenjena na tipičnu stambenu zidanu zgradu u Zagrebu srednje visine, izgrađenu 1960-ih prije suvremenih seizmičkih propisa. Rezultati su pokazali krti posmični mehanizam sloma, uspješno ublažen vanjskim čeličnim egzoskeletom u kritičnom poprečnom smjeru. Razvijeni su novi modeli oštetljivosti za postojeće i ojačano stanje. Analize gubitaka uz nepouzdanosti modela posljedica i potresne opasnosti pokazale su znatna smanjenja gubitaka za velika povratna razdoblja, dok je smanjenje pri nižim intenzitetima ublaženo niskom početnom ranjivošću. Predložena je i nova metrika Generalizirani lokalni maksimum, koja kvantificira učinke različitih mjera intenziteta na modele oštetljivosti te se preferira prosječno spektralno ubrzanja nad vršnim ubrzanjem tla.

dr. sc. Katarina Didulica

Životopis

Rođena je 13. srpnja 1994. u Zadru, Hrvatska, gdje je završila osnovno i srednje obrazovanje u Gimnaziji Vladimira Nazora. 2013. upisala je Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, a diplomski studij nastavila na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, gdje je 2020. stekla akademski naziv magistre inženjerke građevinarstva (Materijali). Od veljače 2021. zaposlena kao asistentica na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu na projektu ReWire pod vodstvom izv. prof. Ane Baričević. 2021. upisala doktorski studij, smjer Materijali u građevinarstvu, te je upisana u Hrvatski znanstveni informacijski sustav (br. 389530). Objavila je 18 recenziranih znanstvenih radova te sudjeluje u nastavi i znanstveno-istraživačkim projektima.

Mentorica: izv. prof. dr. sc. **Ana Baričević**

Datum obrane: 16.3.2026.

Naslov doktorskog rada

Ponašanje mikroarmiranoga morta visokih uporabnih svojstava u ranoj starosti

Sažetak

U ovom doktorskom radu istražen je utjecaj recikliranih polimernih vlakana iz otpadnih guma (RTPF) na ponašanje cementnih kompozita visokih uporabnih svojstava u ranoj starosti, s naglaskom na hidrataciju, mikrostrukturu, unutarnju relativnu vlažnost i autogeno skupljanje. Cilj je bio objasniti mehanizme utjecaja RTPF-a na deformacije ovisno o vodocementnom omjeru i uvjetima vlažnosti. Eksperimentalni program proveden je na cementnoj pasti i mortu radi analize autogenog skupljanja. Uključivao je ispitivanja svježeg stanja, izotermalnu kalorimetriju, mjerenja unutarnje vlage, MIP, TGA, SEM/EDS i mehanička ispitivanja. Analizirana su dva sustava: $v/c = 0.40$ i $v/c = 0.22$. Rezultati pokazuju da RTPF ne utječe izravno na hidrataciju, već djeluje kroz preraspodjelu vlage, promjene pora i razvoj porozne prijelazne zone (ITZ). Kod $v/c = 0.40$ visoka vlaga ograničava prijenos vode iz vlakana, a RTPF smanjuje obradivost, povećava poroznost i blago smanjuje čvrstoću. Kod $v/c = 0.22$ dolazi do preraspodjele vode iz vlakana, usporavanja pada unutarnje vlage i održavanja hidratacije. Mikrostruktura pokazuje povećanu poroznost i formiranje poroznog ITZ-a bogatog Ca(OH)_2 i karbonatima, što objašnjava pad čvrstoće. Autogeno skupljanje ovisi o početnom bubrenju i ograničenju deformacija ($v/c = 0.40$) te odgođenom samoisušivanju ($v/c = 0.22$). Rad definira pouzdan "time zero" i predlaže modele temeljene na relativnoj vlazi za opis deformacija. Rezultati doprinose razvoju održivih kompozita sa smanjenim skupljanjem.

dr. sc. Hanna Miličević

Životopis

Rođena je 1996. u BiH. Godine 2020. stekla je akademski naziv diplomirani inženjer građevinarstva, na Sveučilištu u Zagrebu, na Građevinskom fakultetu, a 2026.godine obranila je i doktorsku disertaciju. Akademске godine 2018./2019. dobila je Dekanovu nagradu, te 2019./2020. je bila stipendistica Hrvatske komore inženjera građevinarstva. Dio doktorskog istraživanja provela je na Lancaster University, te stručni i istraživački boravak na University of Miami, gdje je stekla dodatna iskustva u području obalnog inženjerstva. Sudjelovala je u znanstveno-istraživačkim projektima iz područja upravljanja obalnim područjima (BEACHEX). Od 2021. do danas radi kao asistent na Građevinskom fakultetu u Zagrebu, gdje sudjeluje u nastavnim, znanstvenim i stručnim poslovima.

Mentor: prof. dr. sc. **Dalibor Carević**

Datum obrane: 13.4.2026.

Naslov doktorskog rada

Utjecaj podmorskoga praga na morfodinamiku žala umjetnih plaža

Sažetak

Umjetne šljunčane plaže predstavljaju važan inženjerski pristup ublažavanju obalne erozije i nedostatka prirodnog sedimenta u urbaniziranim priobalnim područjima. Njihova morfodinamička stabilnost određena je složenim međudjelovanjem hidrodinamičkih uvjeta i transporta sedimenta, pri čemu su tijekom olujnih događaja izraženi procesi dislokacije i trajnog gubitka materijala. Stabilnost sustava u velikoj mjeri ovisi o optimizaciji geometrije poprečnog profila te primjeni zaštitnih mjera, među kojima podmorski pragovi imaju značajnu ulogu u modifikaciji valnog polja i disipaciji energije. Cilj rada je kvantitativno odrediti utjecaj dubine krune podmorskog praga i nagiba žala na morfodinamički odgovor umjetnih šljunčanih plaža. Metodologija se temelji na integraciji terenskog monitoringa i numeričkog modeliranja primjenom modela XBeach-Gravel (XBeach-G), kalibriranog i validiranog na šest reprezentativnih olujnih događaja primjenom Brierovog pokazatelja uspješnosti (BSS). Postignuti rezultati ukazuju na visoku pouzdanost modela u reprodukciji dominantnih procesa. Dobiveni rezultati imaju izravnu primjenu u inženjerskoj praksi, omogućujući pouzdanije dimenzioniranje profila plaže te optimizaciju geometrije podmorskog praga i nagiba žala. Time se smanjuju gubici sedimenta, povećava stabilnost sustava i smanjuju troškovi održavanja.

dr. sc. Ivana Milić

Životopis

Rođena je 1992. godine na Malom Lošinj. Diplomirala je 2017. godine na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu na diplomskom studiju usmjerenje Konstrukcije. Na istom fakultetu je 2026. godine na usmjerjenju Inženjerske konstrukcije obranila doktorsku disertaciju. Od 2017. godine objavila je niz znanstvenih radova u koautorstvu. Paralelno s doktorskim studijem, od 2017. godine zaposlena je na radnom mjestu projektanta konstrukcija u više različitih tvrtki. Sudjelovala je u izradi niza stručnih poslova, od idejnih do glavnih i izvedbenih projekata, na području projektiranja konstrukcija raznih vrsta građevina. Njezin stručni rad primarno je usmjeren na statičke i dinamičke proračune te projektiranje armiranobetonskih i čeličnih konstrukcija.

Mentorica: doc. dr. sc. **Jelena Bleiziffer**

Datum obrane: 3.6.2026.

Naslov doktorskog rada

Razvoj metodologije za integraciju ekoloških i ekonomskih kriterija u cilju unapređenja održivosti armiranobetonskih mostova u morskome okolišu

Sažetak

Disertacija se bavi razvojem metodologije procjene održivosti armiranobetonskih (AB) mostova u agresivnom morskome okolišu izloženom djelovanju klorida, kao doprinos aktualnim globalnim strateškim ciljevima za postizanje održivog razvoja i klimatske neutralnosti. Variranjem konstrukcijskih parametara i parametara materijala koji su implementirani kao mjere zaštite od korozije armature, formirane su razne varijante studije slučaja AB mosta. Analiza životnog ciklusa mostova provedena je kroz različite scenarije životnog ciklusa, uključujući scenarij klimatskih promjena. Tijekom razvoja metodologije procjene održivosti mostova, definirani su indikatori održivosti LCA i LCC analiza, na temelju kojih su razvijeni indeksi održivosti za kvantitativno i komparativno vrednovanje održivosti različitih varijanti AB mosta. Parametarskom evaluacijom varijanti AB mosta istražen je utjecaj varijacija konstrukcijskih parametara i parametara materijala na uspostavljene indikatore održivosti. Analizom osjetljivosti utvrđen je utjecaj pojedinih ulaznih varijabli na indikatore održivosti te su identificirane ključne varijable. Komparativnom analizom, elaboracijom rezultata i kritičkim osvrtom pri interpretaciji rezultata, definirane su smjernice za projektiranje održivih AB mostova izloženih agresivnom morskome okolišu. Razvijena metodologija procjene održivosti omogućuje identificiranje kompromisa između različitih AB varijanti u cilju usmjerenja donošenja odluka u fazi projektiranja prema strateškim ciljevima za postizanje održivosti.

dr. sc. Olivera Bedov

Životopis

Rođena je 1993. godine u Novom Sadu. Preddiplomski i diplomski studij završila je 2017. i 2018. godine na Fakultetu tehničkih nauka Sveučilišta u Novom Sadu, gdje je potom upisala doktorski studij Građevinarstva i zaposlila se kao asistentica. Kao stipendistica programa ERA-SMUS+, pet je mjeseci provela na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Lundu u Švedskoj. Od listopada 2021. do veljače 2023. godine bila je stipendistica programa Marie Skłodowska-Curie i asistentica na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, gdje je istodobno bila upisana na doktorski studij u okviru međunarodnog dvojnog doktorata sa Sveučilištem u Novom Sadu. Objavila je 25 znanstvenih i stručnih radova te sudjelovala na konferencijama u zemlji i inozemstvu. Aktivno se služi engleskim jezikom.

Mentorice: izv. prof. dr. sc. **Marijana Serdar**
doc. dr. sc. **Suzana Draganić**

Datum obrane: 3.7.2026.

Naslov dokorskog rada

Mogućnosti primjene pepela suncokretove ljuske kao alternativnog aktivatora za alkalnoaktivirane materijale na bazi zgure

Sažetak

Proizvodnja cementa sudjeluje s oko 7% u ukupnim globalnim emisijama CO₂, a smanjenje njegove uporabe jedna je od temeljnih strategija dekarbonizacije građevinske industrije. Alkalno-aktivirani materijali (AAM) predstavljaju obećavajuću alternativu, no konvencionalni kemijski aktivatori čine značajan udio u njihovom okolišnom otisku i trošku. Ova disertacija istražuje mogućnost valorizacije pepela ljuske suncokreta (SHA), lokalno dostupnog poljoprivrednog otpada bogatog kalijem, kao alternativnog aktivatora za AAM na bazi zgure. Istraživanje je provedeno kroz četiri eksperimentalne faze. Karakterizacija je potvrdila prikladna kemijska i fizička svojstva SHA za alkalnu aktivaciju. Optimizacijom veziva utvrđeni su parametri za primjenu SHA u izvornom stanju uz minimalne tehnološke zahtjeve, a najveća postignuta tlačna čvrstoća je 55 MPa. Na razini betona, kombinacijom SHA i natrijevog silikata postignuta je čvrstoća od 50 MPa. Uvođenje SHA rezultiralo je smanjenjem obradljivosti i 17% nižim modulom elastičnosti. SHA utjecao je na povećanje skupljanja uslijed sušenja. Trajnost nije narušena - kemijski uvjetovani mehanizmi, ponajprije apsorpcija CO₂ potpomognuta hidrotalcitom i vezanje klorida, nadvladali su negativni utjecaj strukture pora, usled povećane kapilarne poroznosti.

Disertacija donosi prvu cjelovitu karakterizaciju utjecaja SHA kao aktivatora na fizikalna, mehanička i trajnosna svojstva alkalno-aktiviranog betona. Rezultati potvrđuju SHA kao održiv aktivator, uz preporuku budućih istraživanja usmjerenih na obradivost i skupljanje.

