

## 5. simpozij doktorskog studija građevinarstva, 9. - 10. 9. 2019., Zagreb : zbornik radova

---

Gumbarević, Sanjin; Milovanović, Bojan; Majstorović, Igor; Ahac, Maja; Mance, Marko; Cvetković, Mladen; Jurić Kaćunić, Danijela; Sylejmani, Arta; Cikojević, Antonija; Gilja, Gordon; ...

**Edited book / Urednička knjiga**

*Publication status / Verzija rada:* **Published version / Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

*Publication year / Godina izdavanja:* **2019**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:237:355947>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-14**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)



# 5. SIMPOZIJ DOKTORSKOG STUDIJA GRAĐEVINARSTVA

9.-10. rujna 2019., Zagreb

Zbornik radova

Urednica  
NINA ŠTIRMER



**Izdavač**

Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
Zagreb, Kačićeva 26

**Urednica**

Prof.dr.sc. Nina Štirmer

**Dizajn naslovnice**

minimum d.o.o.

**Prijelom**

Tanja Vrančić

**Lektura**

Mr. sc. Smiljka Janaček-Kučinić  
Zoran Vulelija (engleski)

**Tisak**

Tiskara Zelina d.d., 2019.

**Naklada**

150 kom.

**ISBN**

ISBN: 978-953-8168-35-2

**DOI**

<https://doi.org/10.5592/CO/PhDSym.2019>

Zagreb, rujan 2019.

**CIP zapis**

je dostupan u računalnome katalogu  
Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu  
pod brojem 001039534.

*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 nanesenu 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.*

**5. SIMPOZIJ  
DOKTORSKOG STUDIJA  
GRAĐEVINARSTVA**

**9.-10. rujna 2019., Zagreb**

**Zbornik radova**

Urednica  
**Nina Štirmer**



## Organizacijski odbor simpozija

|                 |                           |  |
|-----------------|---------------------------|--|
| Prof.dr.sc.     | <b>Nina Štirmer</b>       | Prodekanica za znanost                     |
| Doc.dr.sc.      | <b>Mario Bačić</b>        | Zavod za geotehniku                        |
| Doc.dr.sc.      | <b>Ivan Halkijević</b>    | Zavod za hidrotehniku                      |
| Izv.prof.dr.sc. | <b>Davor Skejić</b>       | Zavod za konstrukcije                      |
| Doc.dr.sc.      | <b>Dario Jukić</b>        | Zavod za matematiku                        |
| Prof.dr.sc.     | <b>Ivana Banjad Pečur</b> | Zavod za materijale                        |
| Izv.prof.dr.sc. | <b>Mladen Vukomanović</b> | Zavod za organizaciju i ekonomiku građenja |
| Doc.dr.sc.      | <b>Ivo Haladin</b>        | Zavod za prometnice                        |
| Doc.dr.sc.      | <b>Ana Skender</b>        | Zavod za tehničku mehaniku                 |
| Doc.dr.sc.      | <b>Silvio Bašić</b>       | Samostalna Katedra za zgradarstvo          |

## Predgovor

Doktorski studij najviši je stupanj formalnog obrazovanja, a svrha mu je izobrazba novih doktora znanosti. Izrada doktorskog rada zasniva se na izvornom znanstvenom istraživanju. Doktorska izobrazba važna je ne samo za razvoj akademske karijere, već odgovara i na sve veće zahtjeve tržišta rada kojemu su za razvoj potrebni stručnjaci koji će pridonijeti stvaranju novih znanja i novih proizvoda. Na doktorskome studiju se uz istraživačke kompetencije, razvijaju i vještine koje se upotrebljavaju u širokom rasponu poslova (komunikacijske i prezentacijske vještine, upravljanje projektima i timom suradnika i sl.), a upravo one pripremaju istraživače za nove izazove u društvu i gospodarstvu, odnosno za nove izazove u razvoju znanstvene ili profesionalne karijere. Program doktorskog studija Građevinarstva zasniva se na provedbi kompetitivnih znanstvenih istraživanja, u okviru relevantnih nacionalnih i međunarodnih znanstvenih projekata, koja imaju vrlo izraženu mogućnost primjene u praksi te tako doprinose razvoju društva temeljenog na neprekidnom razvoju.

Prvi Simpozij doktorskog studija Građevinarstva održan je na Građevinskom fakultetu 2015. godine te se od tada redovito održava u rujnu svake godine. Na prethodna 4 simpozija objavljeno je i prezentirano ukupno 58 radova doktoranada u svim istraživačkim granama studija. Sudjelovanje na Simpoziju s radom koji je pripremljen u koautorstvu s mentorom obvezan je oblik rada za studente prve godine studija čime doktorandi stječu 16 ECTS-a. Cilj Simpozija je da doktorandi predstave stanje područja kojim će se baviti u svom znanstvenom istraživanju te da o aktualnoj problematici i ciljevima svoga istraživanja diskutiraju s nastavnicima doktorskog studija i kolegama. Sudjelovanjem na Simpoziju s prezentacijom rada doktorandi ujedno stječu jezične, prezentacijske i komunikacijske vještine. U ovom zborniku objavljeno je 17 radova doktoranada koji su recenzirani i kojima je dodijeljena oznaka DOI (engl. *Digital Object Identifier*). U zborniku su također objavljeni sažeci doktorskih radova obranjenih u razdoblju od rujna 2018. do srpnja 2019. godine. Zbornik ujedno sadržava sažetke prezentacija dodatnog obrazovanja i usavršavanja zaposlenika Građevinskog fakulteta u akademskoj godini 2018./2019. među kojima su i doktorandi koji na taj način stječu znanja i vještine potrebne za izradu doktorskoga rada.

Kvaliteti zbornika su uz autore radova znatno doprinijeli i recenzenti sa svojim preporukama za poboljšanje te suradnici koji su sudjelovali u lekturi i grafičkom opremanju zbornika. Peto izdanje zbornika Simpozija doktorskog studija građevinarstva predstavlja kontinuitet u razmjeni novih saznanja i istraživanja doktoranada te doprinosi razvoju njihovih istraživačkih kompetencija i komunikacijskih vještina, ali isto tako i razvoju same građevinske industrije.

Zagreb, 2. rujna 2019.

Urednica



Prof.dr.sc. Nina Štirmer



# Sadržaj

|   |     |
|---|-----|
| Predgovor .....   | 5   |
| Utjecaj zrakopropusnosti ovojnice na energijsko svojstvo zgrada<br>Sanjin Gumbarević, doc.dr.sc. Bojan Milovanović .....  | 9   |
| Utjecaj kvalitete geometrije kolosijeka na učinke tramvajskog prometnog sustava<br>Igor Majstorović, doc.dr.sc. Maja Ahac .....                                     | 23  |
| Laboratorijski i terensko određivanje koeficijenta propusnosti<br>Marko Mance, Mladen Cvetković, izv.prof.dr.sc. Danijela Jurić Kačunić .....                       | 35  |
| Energy efficiency of buildings in Kosovo<br>Arta Sylejmani, doc.dr.sc. Bojan Milovanović .....  | 47  |
| Pristup istraživanju prostornog i vremenskog razvoja odbačene kaverne<br>uz riprap zaštitu od podlokavanja<br>Antonija Cikojević, doc.dr.sc. Gordon Gilja .....     | 59  |
| Pregled modela za mjerenje povjerenja u građevinskim projektima<br>Ivona Ivić, prof.dr.sc. Anita Cerić.....   | 69  |
| Mogućnosti primjene pepela drvene biomase u proizvodnji opeke<br>Jelena Šantek Bajto, prof.dr.sc. Nina Štirmer .....  | 81  |
| Poračun ponašanja u potresu armiranobetonskih postojećih i nadograđenih zgrada<br>Alush Shala, doc.dr.sc. Jelena Bleiziffer .....                                   | 95  |
| Utjecaj elastičnog pričvršćenja željezničkog kolosijeka na širenje buke i vibracija<br>Mate Ivančev, doc.dr.sc. Ivo Haladin .....                                   | 105 |
| Modelska standardizacija građevinske ponude metodom<br>dinamičkog strukturnog programiranja<br>mr.sc. Vladimir Križaić, prof.dr.sc. Ivica Završki .....             | 117 |
| Izgradnja modernih urbanih sredina i potreba reinženjeringa građevinskih poduzeća<br>Mario Kralj, prof.dr.sc. Ivica Završki .....                                   | 127 |
| Vrednovanje projekata cestovne prometne infrastrukture<br>Željko Štepan, prof.dr.sc. Vesna Dragčević .....  | 139 |
| Trajnost armiranobetonskih željezničkih pragova<br>Ivan Zovkić, prof.dr.sc. Stjepan Lakušić .....   | 151 |
| Overview of clay as supplementary cementitious material<br>Matea Flegar, doc.dr.sc. Marijana Serdar, dr.sc. Diana Londono-Zuluaga, prof.dr.sc. Karen Scrivener..... | 163 |
| Chloride-induced corrosion of steel embedded in AAMs: the current state of the art<br>Antonino Runci, doc.dr.sc. Marijana Serdar, prof.dr.sc. John Provis .....     | 175 |
| Mogućnost primjene betonskih pragova s elastičnim podlošcima na mostovima<br>Zvonko Perčin, prof.dr.sc. Stjepan Lakušić .....                                       | 187 |

|  |     |
|--|-----|
| Primjena armaturnih mreža u asfaltnim slojevima kolnika<br>Sandra Mihalina, prof.dr.sc. Tatjana Rukavina, doc.dr.sc. Miroslav Šimun .....                            | 197 |
| Potpunije razumijevanje uzroka i procesa širenja oštećenja u betonskim pločama<br>mostova kroz komplementarnu primjenu NDE i SHM<br>prof.dr.sc. Nenad Gucunski ..... | 207 |
| Dodatna obrazovanja i usavršavanja .....   | 209 |
| Sažeci obranjenih doktorskih radova: rujanj 2017. - srpanj 2018 .....  | 217 |

# Utjecaj zrakopropusnosti ovojnice na energijsko svojstvo zgrada

Sanjin Gumbarević<sup>1</sup>, doc.dr.sc. Bojan Milovanović<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, sgumbarevic@grad.hr

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, bmilovanovic@grad.hr

## Sažetak

Utjecaj zrakopropusnosti ovojnice na energijsko svojstvo zgrade nije dovoljno istican i ne pridaje mu se važnost koju svakako ima. Hrvatski propisi zahtijevaju određenu razinu zrakopropusnosti koja bi se trebala kontrolirati ispitivanjem prije tehničkog pregleda zgrade, ali se ispitivanje u velikom broju slučajeva ne provodi. Parametarskom analizom energetske modele dviju zgrada u programskom paketu EnergyPlus prikazan je utjecaj zrakopropusnosti ovojnice na potrebnu godišnju energiju za grijanje, gdje taj utjecaj posebno dolazi do izražaja u zgradama koje su kvalitetno toplinski izolirane.

*Ključne riječi: zrakopropusnost, infiltracija, modeliranje energije zgrade, EnergyPlus, simulacija ponašanja zgrade*

## The impact of envelope airtightness on energy performance of buildings

### Abstract

The impact of airtightness of buildings on energy performance is not adequately presented if we observe its true impact on the building energy demand. The Republic of Croatia requires a certain level of building airtightness, which should be controlled before technical inspection of the building. However, in many cases this airtightness is not controlled at all. Parametric analysis of energy models of two buildings in EnergyPlus shows the impact of airtightness on the annual heating energy demand, where this impact is more significant for well-insulated buildings.

*Key words: airtightness, infiltration, Building Energy Modelling, EnergyPlus, Building Performance Simulation*

## 1 Uvod

Europska unija je s ciljem ostvarenja ušteda u potrošnji primarne energije i smanjenja emisije stakleničkih plinova prepoznala sektor zgradarstva kao glavnu ciljanu skupinu u kojoj bi se te uštede mogle ostvariti na najučinkovitiji način [1]. Iz tog je razloga Europska komisija svojim direktivama ([2]-[5]) propisala obvezu gradnje novih zgrada niske potrošnje energije te obvezu dubinske energetske obnove postojećeg građevinskog fonda s istim ciljem. Uštede se ostvaruju ugradnjom učinkovitijih sustava i uređaja te obnavljanjem ovojnice zgrade ugradnjom nove stolarije te toplinske izolacije. Osim ugradnje materijala boljih toplinskih svojstava čime smanjujemo transmisijske gubitke, velik utjecaj na potrebnu toplinsku energiju za grijanje prema [6] ima infiltracija zraka kroz nenamjerne otvore na ovojnici nastale prilikom nepažnje u procesu gradnje. Kontrola zrakopropusnosti ovojnice po dovršetku građenja je propisana Tehničkim propisom [7] i mora se izvršiti prije tehničkog pregleda zgrade metodom razlike tlaka između unutarnjeg i vanjskog okoliša koja je definirana propisom *HRN EN ISO 9972:2015*. Metoda je također i dobar alat za kontrolu građenja uz potencijalni brz popravak loše izvedenih detalja, a ispitivanjem dobijemo broj izmjene zraka na razlici tlaka od  $50 \text{ Pa}$  ( $n_{50}$ ). Algoritam [6] (izrađen prema normi *HRN EN ISO 13790:2008*) dopušta odabir proračunske vrijednosti za  $n_{50}$  na način da se odabere ili izmjerena vrijednost ispitivanja prema *HRN EN ISO 9972:2015* ili tablično prema kategoriji s obzirom na to planira li se ugradnja mehaničke ventilacije ili ne te se ispitivanjem zrakopropusnosti potvrđuju zadani kriteriji. U inženjerskoj se praksi uvriježilo da se vrijednost  $n_{50}$  u proračunu građevinske fizike uzima u intervalu  $0,5 - 0,6 \text{ h}^{-1}$ . Problem nastaje kada ispitivanjem metodom razlike tlaka treba dokazati tu vrijednost. Naime, potrebna je vrlo kvalitetna gradnja da bi se izvela zgrada takve zrakopropusnosti što nije čest slučaj u praksi. U radu je prikazana analiza utjecaja zrakopropusnosti na energijsko svojstvo zgrade usporedbom različitih razina zrakopropusnosti u programskom paketu za simuliranje energetskog ponašanja zgrade *EnergyPlus* [8] koji zadovoljava provjeru prema američkoj normi *ASHRAE Standard 140* [9]. Analizirane su dvije zgrade na kojima je provedena parametarska analiza utjecaja zrakopropusnosti ovojnice na potrebnu godišnju energiju za grijanje.

## 2 Zrakopropusnost ovojnice zgrade

Infiltracija zraka kroz ovojnicu zgrade je vrlo važan parametar u određivanju potrebne godišnje energije za grijanje. Infiltracija je fizikalni fenomen koji nastaje prilikom razlike tlaka između okoliša zgrade i vanjskog okoliša, a odvija se kroz nenamjerne otvore na ovojnici zgrade. Ona ovisi o brzini vjetera, temperaturi i lokaciji [10]. Infiltracija se izravno može odrediti metodom "tracer gas" prema normi *HRN EN ISO*

12569:2017, gdje se prati koncentracija karakterističnog plina u normalnim uporabnim uvjetima zgrade pa se rezultati moraju i interpretirati u skladu s parametrima o kojima ovisi. Plinovi koji se unose u promatranu zonu i čija se koncentracija prati u vremenu, moraju prema [11] zadovoljavati sljedeće uvjete:

- *sigurnost*: mora biti nezapaljiv, neotrovan i hipoalergijski
- *inertnost*: ne smije reagirati ni s kakvim elementom u području ispitivanja niti izvan njega
- *neosjetljivost*: ne smije utjecati na karakteristike koje se žele odrediti
- *unikatnost*: ne smije biti plin koji se inače nalazi u zraku
- *mjerljivost*: koncentracija mora biti mjerljiva postojećim uređajima.

Rezultati mjerenja metodom “*tracer gas*” prikazuju količinu zraka koja se infiltrirala u zonu za koju se provodi mjerenje u promatranom vremenu. Kako infiltracija, pa tako i metoda “*tracer gas*”, uvelike ovise o dodatnim parametrima uz samu zrakopropusnost ovojnice, tome se pokušalo doskočiti razvijanjem metode koja ih neutralizira nametanjem razlike tlaka između unutarnjeg i vanjskog okoliša ovojnice - metoda razlike tlaka.

## 2.1 Ispitivanje zrakopropusnosti ovojnice metodom razlike tlaka

Kako bi se uklonio utjecaj klimatskih uvjeta na određivanje zrakopropusnosti ovojnice zgrade, razvijena je metoda koja je opisana normom *HRN EN ISO 9972:2015*. Metoda minimalno ovisi o klimatskim uvjetima jer se određuje zrakopropusnost ovojnice zgrade kontroliranim razlikom tlaka (promatra se razlika u temperaturi između unutarnjeg prostora i vanjskog okoliša, brzina vjetera, relativna vlažnost zraka i vanjski tlak te su normom definirani granični uvjeti). Razlika tlaka se realizira ventilatorom koji je povezan s tlakomjerom i računalom (slika 1.a). Za određenu se razliku tlaka mjeri i bilježi protok zraka kroz ventilator. Mjerenje se odvija za dva slučaja:

- *povišeni tlak* u zgradi u odnosu na vanjski
- *manji tlak* u zgradi u odnosu na vanjski.

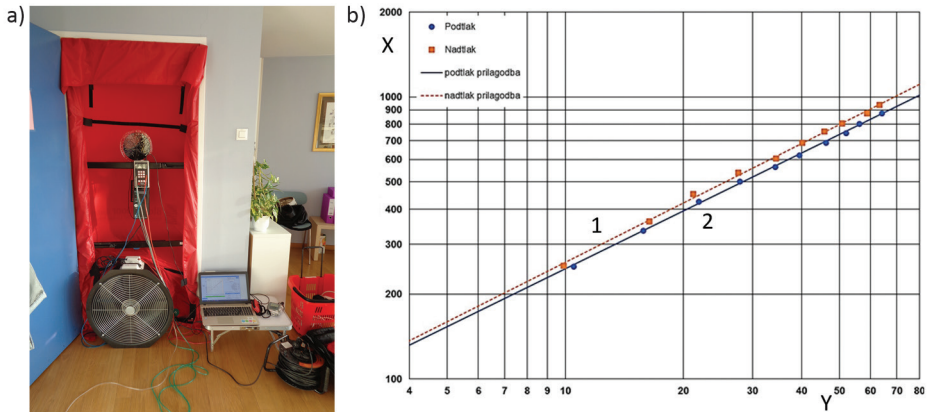
Primjer bilježenja rezultata prema *HRN EN ISO 9972:2015* prikazuje slika 1.b. Za svaku se postavljenu razliku tlaka,  $\Delta p_r$ , bilježi protok zraka kroz ventilator,  $q_r$ , i iscrtaava graf (1) u logaritamskom mjerilu kako i prikazuje slika 1.b:

$$q_{pr} = C_L(\Delta p)^n \quad (1)$$

Koeficijenti  $C_L$  (koeficijent propusnosti zraka) i  $n$  (koeficijent strujanja zraka) računaju se prema *HRN EN ISO 9972:2015* (Annex C), odnosno oni su izlazni podaci mjerenja. Izraz (1) je bitan u određivanju zrakopropusnosti ovojnice pri razlici tlaka od *50 Pa* te pri pravilnoj procjeni protoka infiltriranog zraka u zonu. Prvi je put upo-



trijebljen u radu M. H. Shermana i M. T. Grimsruda [12], a u istom je radu predložena i projektirana infiltracija kao izmjena zraka pri razlici tlaka od  $4 Pa$ , što se i danas često koristi u Sjedinjenim Američkim Državama.



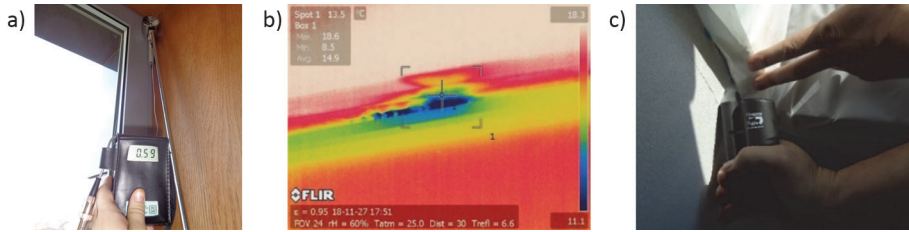
Slika 1. a) Oprema za ispitivanje zrakopropusnosti metodom kontrolirane razlike tlaka. b) Rezultati ispitivanja zrakopropusnosti metodom kontrolirane razlike tlaka prema HRN EN ISO 9972:2015 (legenda: 1 - ispitivanje nadtlakom, 2 - ispitivanje podtlakom, X - razlika tlakova u Pa, Y - izmjena zraka u m³/h)

Nakon što je graf ovisnosti protoka zraka kroz ventilator o razlici tlakova između unutarnjeg i vanjskog okoliša iscrtan, može se odrediti srednji protok zraka za razliku tlaka od  $50 Pa$  (2) jer se na osnovi njega preko izraza (3) odredi broj izmjena zraka prilikom razlike tlaka od  $50 Pa$ ,  $n_{50}$ . Broj izmjene zraka prilikom razlike tlaka od  $50 Pa$  se određuje kao kvocijent protoka zraka na istoj razlici tlaka,  $q_{50}$ , i unutarnjeg volumena,  $V$ , ispitivane zone:

$$q_{50} = C_l(50)^n \quad (2)$$

$$n_{50} = \frac{q_{50}}{V} \quad (3)$$

Koeficijent  $n_{50}$  je važan jer se koristi kao referentan za usporedbu i dokazivanje zrakopropusnosti ovojnice kada je potrebno zadovoljiti određeni propis. Ako imamo izmjerenu vrijednost  $n_{50}$ , prema HRN EN ISO 13789:2017 možemo grubo procijeniti broj izmjene zraka infiltracijom kao  $n_{inf} = n_{50}/20$ .



**Slika 2. Metode otkrivanja nedostataka na ovojnici prilikom ispitivanja metodom razlike tlaka: a) provjera strujanja anemometrom, b) pregled ovojnice infracrvenom kamerom prilikom stvaranja podtlaka (mora postojati razlika u temperaturi između vanjskog i unutarnjeg okoliša), c) praćenje kretanja dima prilikom nadtlaka**

Dodatak normi *HRN EN ISO 9972:2015 (Annex E)* preporuča nekoliko metoda pronalaska nenamjernih otvora na ovojnici, što ispitivanje zrakopropusnosti ovojnice metodom razlike tlaka dodatno čini i alatom za kontrolu kvalitete izvođenja ovojnice zgrade (uključujući ugradnju stolarije i bravarije što su najčešće slaba mjesta na ovojnici). Slika 2 prikazuje i opisuje metode pronalaska mjesta infiltracije.

## 2.2 Zrakopropusnost ovojnice u hrvatskim propisima

U hrvatskim se propisima broj izmjena zraka pri razlici tlaka od  $50 \text{ Pa}$  primjenjuje za dokazivanje propisane zrakopropusnosti ovojnice prema Tehničkom propisu [7] u slučaju kada se projektiraju zgrade gotovo nulte energije ili zgrade koje se projektiraju na:

- $Q''_{\text{Hn,d}} \leq 50 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , kada srednja mjesečna temperatura vanjskog zraka najhladnijeg mjeseca na lokaciji zgrade jest  $\leq 3^\circ\text{C}$ ;
- $Q''_{\text{Hn,d}} \leq 25 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , kada srednja mjesečna temperatura vanjskog zraka najhladnijeg mjeseca na lokaciji zgrade jest  $> 3^\circ\text{C}$ , gdje je  $Q''_{\text{H,nd}}$  godišnja potrebna toplinska energija za grijanje po jedinici ploštine korisne površine zgrade.

Kriteriji koje  $n_{50}$  mora zadovoljiti odnose se na dva slučaja s obzirom je li u zgradi ugrađena mehanička ventilacija ili nije:

- $n_{50} \leq 3,0 \text{ h}^{-1}$ , za zgrade koje nemaju mehanički uređaj za ventilaciju;
- $n_{50} \leq 1,5 \text{ h}^{-1}$  za zgrade s mehaničkim uređajem za ventilaciju.

U algoritmu [6] koji je u uporabi iako je norma po kojoj je izrađen povučena,  $n_{50}$  se koristi za izračun potrebne toplinske energije uslijed infiltracije (4) preko koeficijenta izmjene topline uslijed infiltracije (5) s tim da se uzima procijenjena vrijednost izmjene zraka uslijed infiltracije (6) koja je bazirana na  $n_{50}$ :

$$Q_{\text{Ve,inf}} = \frac{H_{\text{Ve,inf}} (\vartheta_{\text{init}} - \vartheta_e)}{1000} t \quad [\text{kWh}] \quad (4)$$

$$H_{Ve,inf} = n_{inf} V \rho_a c_{p,a} \quad [W/K] \quad (5)$$

$$n_{inf} = e_{wind} n_{50} \quad [h^{-1}] \quad (6)$$

Sva tri izraza (4) - (6) su preuzeta iz njemačke norme *DIN 18599-2* [13], a ostali koeficijenti u izrazima koji nisu do sada opisani su:

- $\vartheta_{init}$  - unutarnja temperatura grijane zone [°C]
- $\vartheta_e$  - srednja vanjska temperatura za proračunski period [°C]
- $t$  - proračunsko vrijeme
- $\rho_a$  - gustoća zraka
- $c_{p,a}$  - specifični toplinski kapacitet zraka
- $e_{wind}$  - faktor zaštićenosti zgrade od vjetra.

U izrazu (6), vrijednost  $n_{50}$  se može odrediti na dva načina, može se uzeti mjerena vrijednost zrakopropusnosti zgrade pa se ona kao takva mora i dokazati ispitivanjem metodom razlike tlaka, ili se može uzeti ovisno o tome ima li zgrada ugrađen mehanički uređaj za ventilaciju:

- 1) zgrade bez mehaničkog uređaja za ventilaciju,  $n_{50} = 2$  (zahtjev zrakopropusnost i  $n_{50} \leq 3,0 \text{ h}^{-1}$ );
- 2) zgrade s mehaničkim uređajem za ventilaciju,  $n_{50} = 1$  (zahtjev zrakopropusnosti  $n_{50} \leq 1,5 \text{ h}^{-1}$ ).

### 3 Simulacija energetskeg ponašanja zgrade s različitim slučajevima zrakopropusnosti

Radi prikazivanja utjecaja zrakopropusnosti ovojnice na energetske ponašanje zgrade korišten je programski paket *EnergyPlus* s dodatkom *OpenStudio*. Programski paketi su otvorenog koda. *EnergyPlus* je programsko rješenje koje izvršava simulaciju na osnovi zadanih ulaznih parametara u obliku *.idf* datoteke analogno "solverima" numeričkih metoda (primjerice *Elmer* ili *Code\_Aster* za metodu konačnih elemenata). Programski paket *OpenStudio* se koristi za pomoć pri oblikovanju ulazne *.idf* datoteke. Učinkovitost programskih paketa za energetske simulacije zgrada ocjenjuje se američkom normom *ASHRAE Standard 140* [9] gdje su pripremljeni testovi koje svaka verzija programskog paketa mora zadovoljiti kako bi on bio prihvaćen u struci. Nakon što je u potpunosti razvijen i testiran, programski paket *EnergyPlus* je objavljen u utjecajnom časopisu [8] od kada i kreće njegova značajnija uporaba. Svi ugrađeni matematički simulacijski modeli su razumljivo opisani u dokumentaciji [14], a upućuju korisnika i na detaljnije istraživanje modela s uputama na radove iz kojih su preuzeti ili na opsežan i koristan priručnik Američkog društva *ASHRAE (The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)* [15]. Kako se

u radu proučava utjecaj zrakopropusnosti ovojnice, odnosno toplinski gubici infiltracijom, korišten je model infiltracije koji povezuje koeficijente dobivene ispitivanjem zrakopropusnosti metodom razlike tlaka, a baziran je na izrazu (1). Model su razvili *Walker i Wilson*, a jednostavno je opisan u [15] te detaljno s razvojem i validacijom modela u [16]. Opisani model infiltracije u *EnergyPlusu* se koristi preko izraza (7):

$$Infiltration = (F_{Schedule}) \sqrt{\left( c C_s \Delta T^n \right)^2 + \left[ c C_w (s \cdot WindSpeed)^{2n} \right]^2} \quad (7)$$

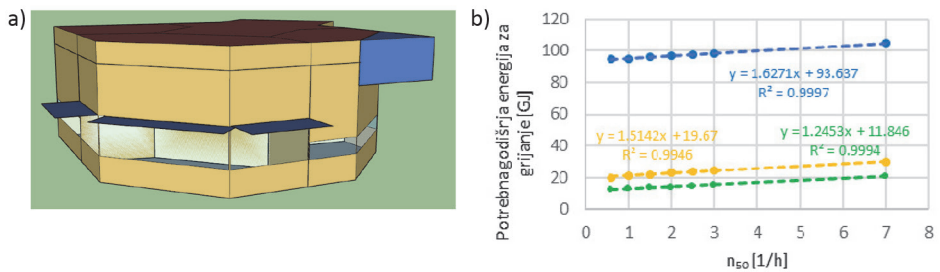
gdje su:

- $F_{Schedule}$  - bezdimenzijski koeficijent rasporeda korištenja toplinske zone
- $c$  - koeficijent strujanja zraka dobiven ispitivanjem [ $m^3/(s \cdot Pa)$ ]
- $C_s$  - koeficijent infiltracije uzrokovane efektom dimnjaka [( $Pa/K$ )<sup>n</sup>]
- $n$  - eksponent iz ispitivanja ovisan o razlici tlaka;
- $C_w$  - koeficijent infiltracije uzrokovane vjetrom [( $Pa \cdot s^2/m^2$ )<sup>n</sup>]
- $s$  - faktor zaklona zgrade.

Osim opisanog modela, programski paket sadrži još dva modela infiltracije (bazirani su na radovima [17, 18]) koji su jednostavniji i nisu prikladni za usporedbu kakva je planirana u ovom istraživanju.

### 3.1 Zgrada 1

Za početak je analiziran model koji je pokazni primjer programskog paketa otvorenog koda *OpenStudio*. Slika 3.b daje grafički prikaz modela. Korisna površina zgrade je  $82 m^2$ , a volumen grijanog zraka je  $275 m^3$ . Materijali ovojnice ( $U$  vrijednosti su opisane u nastavku) i raspored korištenja zgrade ostavljeni su kao u primjeru (uredi s najvećim intenzitetom korištenja  $7 h - 17 h$ ). Model zrakopropusnosti prema [16] koji je opisan u ovom radu te definiran jednadžbom (7) trebalo je definirati preko *IDFEditor*-a (programskog paketa *EnergyPlus*) jer programsko rješenje *OpenStudio* podržava unos samo prema jednom od jednostavnija dva modela zrakopropusnosti ([17, 18]). Zgrada je simulirana za klimatske podatke austrijskog grada Graza, a izvršena je izravno u programskom paketu *EnergyPlus* nakon prepravljanja ulazne *.idf* datoteke izvezene iz programskog paketa *OpenStudio*. Analizirani su rezultati za razine zrakopropusnosti kako prikazuje tablica 1. Dodatno je na modelu zamijenjen materijal ovojnice (vanjski zidovi, krov i pod) betonom debljine  $20 cm$  ( $U = 2,860 W/m^2 \cdot K$ ) te kombinacijom slojeva toplinske izolacije jedne zgrade gotovo nulte energije (*NZEB izolacija* u nastavku:  $U = 0,162 W/m^2 \cdot K$ ). Prozori u svim slučajevima imaju  $U_w = 2,5 W/m^2 \cdot K$  i  $g_{\perp} = 0,375$ . Za primjer iz programskog paketa *OpenStudio* materijali ovojnice imaju sljedeće parametre: vanjski zidovi  $U = 0,382 W/m^2 \cdot K$ , krov  $U = 0,178 W/m^2 \cdot K$  i pod na tlu  $U = 2,24 W/m^2 \cdot K$ .



Slika 3. Zgrada 1: a) shematski prikaz ; b) rezultati: plavo - beton, žuto - izolacija prema primjeru, zeleno - NZEB izolacija

Tablica 1. prikazuje rezultate simulirane potrebne godišnje energije za grijanje za zadani slučaj zrakopropusnosti i za različite sustave toplinske izolacije vanjske ovojnice.

Tablica 1. Ovisnost simulirane potrebne godišnje energije za grijanje o zrakopropusnosti i toplinskim karakteristikama ovojnice za *zgradu 1*

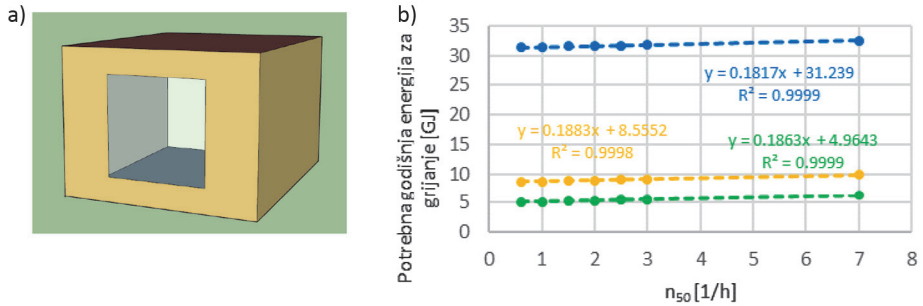
| $n_{50}$ | Zgrada 1 (beton) |                    | Zgrada 1 (primjer OpenStudio) |                    | Zgrada 1 (NZEB izolacija) |                    |
|----------|------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|---------------------------|--------------------|
|          | GJ               | kWh/m <sup>2</sup> | GJ                            | kWh/m <sup>2</sup> | GJ                        | kWh/m <sup>2</sup> |
| 0,6      | 94,66            | 320,66             | 20,08                         | 68,02              | 12,69                     | 42,99              |
| 1,0      | 95,13            | 322,26             | 21,37                         | 72,42              | 13,14                     | 44,51              |
| 1,5      | 96,11            | 325,58             | 22,09                         | 74,83              | 13,7                      | 46,41              |
| 2,0      | 96,92            | 328,32             | 22,82                         | 77,30              | 14,29                     | 48,41              |
| 2,5      | 97,73            | 331,06             | 23,54                         | 79,74              | 14,89                     | 50,44              |
| 3,0      | 98,54            | 333,81             | 24,28                         | 82,25              | 15,51                     | 52,54              |
| 7,0      | 105,01           | 355,72             | 30,16                         | 102,17             | 20,62                     | 69,85              |

Ako rezultate simulacije prikažemo na grafikonu, primjećuje se kvazilinearna ovisnost potrebne energije za grijanje o zrakopropusnosti (slika 3.b). Koeficijent koji je variran jest koeficijent protoka zraka,  $c$ , iz izraza (7), odnosno  $C_L$  iz izraza (1) uz pretpostavku da je eksponent iz oba izraza konstantan ( $n = 0,67$  prema [16]). Koeficijent  $c$  je definiran preko izraza (1) tako da zadovolji određenu razinu zrakopropusnosti na razlici tlaka od  $50 Pa$ . Ostali koeficijenti modela (7) su definirani prema [15] i konstantni su prilikom svih simulacija.

### 3.2 Zgrada 2

Nakon provedene 21 energetske simulacije na *zgradi 1*, izrađen je jednostavan model korisne površine  $12 m^2$  i volumena grijanog zraka  $60 m^3$  s prozorom  $2 \times 2 m$  na

jugu (slika 4.a). Materijali, klimatski podaci i raspored korištenja *zgrade 2* su analogni *zgradi 1* kako bi se mogli uspoređivati. Ponovno je izvršena parametarska analiza s obzirom na zrakopropusnost ovojnice na novih 21 modela analognih modelima *zgrade 1*.



Slika 4. Zgrada 2: a) shematski prikaz; b) rezultati: plavo - beton, žuto - izolacija prema primjeru, zeleno - NZEB izolacija

Rezultate energetskih simulacija prikazuje tablica 2. te grafikon (slika 4.b) gdje možemo vidjeti da je ovisnost simulirane potrebne godišnje energije za grijanje ponovno kvaziliniarno ovisna o zrakopropusnosti ovojnice.

Tablica 2. Ovisnost simulirane potrebne godišnje energije za grijanje o zrakopropusnosti i toplinskim karakteristikama ovojnice za *zgradu 2*

| $n_{50}$ | Zgrada 2 (beton) |                    | Zgrada 2 (primjer OpenStudio) |                    | Zgrada 2 (NZEB izolacija) |                    |
|----------|------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|---------------------------|--------------------|
|          | GJ               | kWh/m <sup>2</sup> | GJ                            | kWh/m <sup>2</sup> | GJ                        | kWh/m <sup>2</sup> |
| 0,6      | 31,35            | 725,69             | 8,66                          | 200,46             | 5,08                      | 117,59             |
| 1,0      | 31,42            | 727,31             | 8,74                          | 202,31             | 5,15                      | 119,21             |
| 1,5      | 31,51            | 729,39             | 8,84                          | 204,63             | 5,24                      | 121,29             |
| 2,0      | 31,6             | 731,48             | 8,94                          | 206,94             | 5,34                      | 123,61             |
| 2,5      | 31,69            | 733,56             | 9,03                          | 209,03             | 5,43                      | 125,69             |
| 3,0      | 31,79            | 735,88             | 9,12                          | 211,11             | 5,52                      | 127,78             |
| 7,0      | 32,51            | 752,55             | 9,87                          | 228,47             | 6,27                      | 145,14             |

## 4 Rasprava

Rezultati energetske simulacije za analizirane zgrade donose nekoliko korisnih informacija. Na grafikonima (slike 3.b i 4.b) možemo vidjeti da je odnos između zrakopropusnosti pri razlici tlaka od  $50 \text{ Pa}$  i potrebne godišnje energije za grijanje kvazilinearan. Štoviše, u tablicama (tablice 1. i 2.) možemo vidjeti da za obje zgrade potrebna godišnja energija za grijanje raste kako raste i zrakopropusnost. Ako se usporede vrijednosti zrakopropusnosti (tablica 3.) na koje se najčešće projektiraju zgrade ( $n_{50} = 0,6 \text{ h}^{-1}$ ) s čestim vrijednostima u praksi ( $n_{50} \geq 30 \text{ h}^{-1}$ ) (može se primijetiti da se ta razlika manje osjeti za loše toplinski izoliranu zgradu (zgrada 1 4,1 %, zgrada 2 1,4 %), u odnosu na zgradu koja je dobro toplinski izolirana (zgrada 1 22,22 %, zgrada 2 8,66 %). Kako bi se prikazalo koliko su te razlike značajne, izrađena su dodatna dva modela energetskog ponašanja za zgradu 1. Za model s NZEB izolacijom u kojemu je zrakopropusnost  $n_{50} = 3,0 \text{ h}^{-1}$  određena je izolacija krova i zidova da pokrije razliku u toplinskim gubicima. Za analiziranu razliku između  $n_{50} = 3,0 \text{ h}^{-1}$  i  $n_{50} = 0,6 \text{ h}^{-1}$  (2,82 GJ, odnosno 22,22 %) pokazalo se da je potrebno izvesti 34 cm kamene vune u odnosu na 10 cm kako je projektirano, odnosno dodatnih 24 cm toplinske izolacije. Za razliku između  $n_{50} = 3,0 \text{ h}^{-1}$  i  $n_{50} = 1,5 \text{ h}^{-1}$  (1,81 GJ, odnosno 14,26 %) potrebno je 20 cm kamene vune što je 10 cm više, odnosno upravo dvostruko veći sloj izolacije.

**Tablica 3. Utjecaj izolacije zgrade na ovisnost potrebne godišnje energije za grijanje o zrakopropusnosti**

| $n_{50} [= \text{h}^{-1}]$ | Zgrada 1 (beton) [GJ] | Zgrada 1 (NZEB izolacija) [GJ] | Zgrada 2 (beton) [GJ] | Zgrada 2 (NZEB izolacija) [GJ] |
|----------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| 0,6                        | 94,66                 | 12,69                          | 31,35                 | 5,08                           |
| 3,0                        | 98,54                 | 15,51                          | 31,79                 | 5,52                           |
| Razlika [%]                | 4,1 %                 | 2,2%                           | 1,4%                  | 8,66 %                         |

Analizom rezultata je također utvrđena ovisnost između utjecaja količine grijanog volumena zraka i zrakopropusnosti ovojnice. Kako bi se dodatno ispitaio taj utjecaj, izrađeno je novih 6 energetske simulacije na modelima koji su nastali dvostrukim povećanjem geometrije analiziranih modela uz zadržavanje svih ostalih postavki kao u prethodnim slučajevima. Modeli su analizirani za slučajeve zrakopropusnosti  $n_{50} = 3,0 \text{ h}^{-1}$  i  $n_{50} = 0,6 \text{ h}^{-1}$  i NZEB izolaciju te jedan slučaj za izolaciju kao u primjeru programskog paketa *OpenStudio* (zgrada 1 primjer *OpenStudio*). Rezultati koji dodatno potvrđuju dosadašnja razmatranja prikazuje tablica 4.

Tablica 4. Potrebna godišnja energija za grijanje ovisna o zrakopropusnosti i grijanom volumenu

| Analizirani volumen | Zgrada 1 (NZEB izolacija) |          | Zgrada 1 (primjer OpenStudio) |          | Zgrada 2 (NZEB izolacija) |         |
|---------------------|---------------------------|----------|-------------------------------|----------|---------------------------|---------|
|                     | 1 x V                     | 2 x V    | 1 x V                         | 2 x V    | 1 x V                     | 2 x V   |
| $n_{50}=0,6h^{-1}$  | 12,69 GJ                  | 19,59 GJ | 20,08 GJ                      | 26,73 GJ | 5,08 GJ                   | 5,78 GJ |
| $n_{50}=3,0h^{-1}$  | 15,51 GJ                  | 46,32 GJ | 24,28 GJ                      | 55,56 GJ | 5,52 GJ                   | 9,46 GJ |
| Razlika             | 22,22 %                   | 136,45 % | 20,92 %                       | 107,86 % | 8,66 %                    | 63,67 % |

## 5 Zaključak

Analizom 50 energetskih modela programskim paketom *EnergyPlus* na kojima je provedena parametarska analiza moguće je iskazati nekoliko zaključaka. Prvi i najvažniji jest taj da utjecaj zrakopropusnosti raste kako je zgrada bolje toplinski izolirana, što neizravno prikazuju tablice 1. i 2. te izravno uz prikaz utjecaja u postocima, tablica 3. Nadalje, analizom u poglavlju *Rasprava* može se zaključiti da je uvelike isplativije povećati zrakopropusnost ovojnice nego dodavati novi sloj toplinske izolacije koji bi pokrio razliku u potrebnoj energiji za grijanje. Usporedimo li utjecaj koji možemo ostvariti toplinskom izolacijom ovojnice s utjecajem poboljšanja zrakopropusnosti ovojnice na uštede u energiji za grijanje, možemo zaključiti da za analizirane slučajeve značajnije uštede ostvarujemo toplinskim izoliranjem zgrade, dok utjecaj smanjenja zrakopropusnosti ovojnice dobiva na važnosti tek kada je zgrada adekvatno toplinski izolirana. Iz tablice 1. možemo zaključiti da se učinak toplinske izolacije kakav je definiran u modelu (zgrada 1) ostvaruje u obliku uštede, odnosno smanjenja potrebne godišnje energije za grijanje za 86,5 % ( $n_{50} = 0,6$ ) odnosno 84,3 % ( $n_{50} = 3,0$ ) dok se utjecaj zrakopropusnosti ovojnice ostvaruje tek za adekvatno izoliranu građevinu (za iste slučajeve zrakopropusnosti): 4,1 % (neizolirana), 22,2 % (izolirana). Analogni zaključci se mogu dobiti analizom tablice 2. (zgrada 2) - utjecaj toplinske izolacije: 83,8 % ( $n_{50} = 0,6$ ); 82,6 % ( $n_{50} = 3,0$ ); utjecaj zrakopropusnosti: 1,4 % (neizolirana); 8,7 % (izolirana). Analizom koju prikazuje tablica 4. može se također primijetiti da se utjecaj zrakopropusnosti povećava kako se i povećava grijani volumen.

Pregledom stanja područja, teorijskih postavki i normativnih okvira fenomena zrakopropusnosti ovojnice zgrade, može se zaključiti da ona ima veliku ulogu u ostvarenju ušteda u smislu racionalizacije potrošnje energije u zgradama. Osim toga, metode mjerenja zrakopropusnosti ovojnice pomažu u kontroli kvalitete izvođenja zgrade s mogućnošću otklanjanja nedostataka na ovojnici prilikom ispitivanja. Postavlja se pitanje zašto je ovaj segment kontrole izvođenja ovojnice zgrade zapostavljen iako je i reguliran pravnim aktima Republike Hrvatske. Kada se promotre rezultati simulacija energetskih modela, može se vidjeti golem utjecaj zrakopropusnosti ovojnice na potrebnu godišnju energiju za grijanje što je još jedna činjenica koja ide u prilog postavljanju prethodnog pitanja.



## Zahvala

Autor Sanjin Gumbarević zahvaljuje Hrvatskoj zakladi za znanost i Europskom socijalnom fondu na podršci preko projekta ESF DOK-01-2018.

## Literatura

- [1] Europska komisija: Energy Efficiency Plan 2011, Brussels, 2011.
- [2] Europska komisija: Direktiva 2010/31/EU Europskog parlamenta i vijeća od 19. svibnja 2010. o energetskej učinkovitosti zgrada, *Službeni list Europske unije*, pp. 124-146, 2010.
- [3] Europska komisija: Direktiva (EU) 2018/844 Europskog parlamenta i vijeća od 30. svibnja 2018. o izmjeni Direktive 2010/31/EU o energetskim svojstvima zgrada i Direktive 2012/27/EU o energetskej učinkovitosti, *Službeni list Europske unije*, pp. 75-91, 2018.
- [4] Europska komisija: Direktiva 2012/27/EU Europskog parlamenta i vijeća od 25. listopada 2012. o energetskej učinkovitosti, izmjeni direktiva 2009/125/EZ i 2010/30/EU i stavljanju izvan snage direktiva 2004/8/EZ i 2006/32/EZ, vol. 004, *Službeni list Europske unije*, pp. 202-257, 2012.
- [5] Europska komisija: Direktiva (EU) 2018/2002 Europskog parlamenta i vijeća od 11. prosinca 2018. o izmjeni Direktive 2012/27/EU o energetskej učinkovitosti, no. 3, *Službeni list Europske unije*, pp. 210-230, 2018.
- [6] Soldo, V., Novak, S., Horvat, I.: Algoritam za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prema HRN EN 13790, Zagreb, 2017.
- [7] Ministarstvo graditeljstva i prostornog uređenja Republike Hrvatske: Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskej zaštiti u zgradama, *Narodne novine* (2015), OG 128/15, 70/18, 73/18, 86/18.
- [8] Crawley, D. B. et al.: EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program, *Energy and Buildings*, vol. 33, no. 4, pp. 319-331, 2002.
- [9] ASHRAE: Standard 140-2017 -- Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs (ANSI Approved), approved by American National Standards Institute 2017.
- [10] Sherman, M. H., Chan, R.: *Building Airtightness: Research and Practice*, LBNL, Berkeley 2004.
- [11] Sherman, M. H.: Tracer-gas techniques for measuring ventilation in a single zone, *Building and Environment*, vol. 25, no. 4, pp. 365-374, 1990.

- [12] Sherman, M. R., Grimsrud, D. T.: *Measurement of infiltration using fan pressurization and weather data*, LBNL, Berkeley, 1980.
- [13] Deutsches Institut für Normung: DIN 18599-2 -- Energy efficiency of buildings - Calculation of the net, final and primary energy demand for heating, cooling, ventilation, domestic hot water and lighting - Part 2: Net energy demand for heating and cooling of building zones, 2018.
- [14] U.S. Department of Energy: *Engineering Reference*, EnergyPlus™ Version 9.1.0 Documentation, 2019.
- [15] ASHRAE: *Handbook - Fundamentals (SI Edition)*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2017.
- [16] Walker, I. S., Wilson, D. J.: Field validation of algebraic equations for stack and wind driven air infiltration calculations, *ASHRAE Transactions*, vol. 104, no. 2, p. 118, 1998.
- [17] Sherman, M. H. Grimsrud, D. T.: *Infiltration-Pressurization Correlation: Simplified Physical Modeling*, LBNL, Berkeley, 1980
- [18] Coblenz, C. W., Achenbach, P. R.: Field Measurement of Ten Electrically-Heated Houses, *ASHRAE Transactions*, pp. 358-365, 1963.



# Utjecaj kvalitete geometrije kolosijeka na učinke tramvajskog prometnog sustava

Igor Majstorović<sup>1</sup>, doc.dr.sc. Maja Ahac<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, majstor@grad.hr

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, mahac@grad.hr

## Sažetak

U ovome radu prikazan je, na primjeru tramvajskog sustava Grada Osijeka, utjecaj degradacije kvalitete geometrije tramvajskog kolosijeka na brzinu putovanja tramvajskog vozila, tj. na promjenu prometne ponude te posljedično na prometnu potražnju. Promjena kvalitete geometrije tramvajskog kolosijeka tijekom uporabe ima izravan utjecaj na smanjenje brzine kretanja tramvajskog vozila, tj. na povećanje trajanja putovanja tramvajem. Posljedično, promjena kvalitete geometrije tramvajskog kolosijeka utječe na promjenu razine usluge, te konačno na promjenu broja korisnika tramvajskog prometnog sustava. Planiranjem i pravovremenim održavanjem tramvajskog kolosijeka moguće je smanjiti negativne utjecaje promjene kvalitete geometrije tramvajskog kolosijeka na učinke tramvajskog prometnog sustava.

*Ključne riječi: geometrija kolosijeka, tramvajski sustav, brzina putovanja, prometni pokazatelji, operativni pokazatelji, modeliranje*

## Effect of track geometry quality on tram transport system indicators

### Abstract

This paper shows, on the example of the tram system operated in the city of Osijek, the effect of the quality of tram track geometry on the tram travel speed, i.e. on the change in transport supply and, consequently, in transport demand. Degraded quality of the tram track geometry has a direct impact on tram speed and, hence, on the increase in travel time. Consequently, degraded quality of track geometry affects the level of service and, finally, the number of passengers in the tram transport system. Negative impacts of the tram track geometry degradation on proper operation of the tram transport system can be reduced by proper planning and timely maintenance of tram tracks.

*Key words: track geometry, tram system, travel speed, transport indicators, operating indicators, modelling*

## 1 Uvod

Učinkovito praćenje i kontrola voznog reda, u realnom vremenu i planiranoj budućnosti, odavno je prepoznato kao ključni preduvjet za održavanje visoke kvalitete usluge na visokofrekventnim i visokokapacitetnim gradskim tračničkim sustavima. Ključan podatak na temelju kojeg se određuje vozni red linije jest brzina putovanja. Na postojećem sustavu ova brzina je rezultat prometnih učinaka ponude i potražnje u vremenu promatranja, a izračunava se iz omjera dviju mjerljivih varijabli, prijeđenog puta i ukupnog vremena putovanja vozila na dionici (uzimajući u obzir i vrijeme stajanja vozila bez obzira na razlog).

U slučaju planiranja novog sustava ili promjena prometne ponude i/ili potražnje u sustavu javnog ili individualnog prijevoza putnika (kao posljedice promjena u društvu, ekonomiji, namjeni prostora ili putnih navika) izračun voznog reda provodi se mehaničko-empirijskim metodama. Pomoću procijenjenih vrijednosti brzine vožnje izračunava se inicijalni vozni red koji se zatim korigira ovisno o uporabnim prometnim karakteristikama.

U ovome radu dan je pregled postojećih modela predviđanja brzine putovanja, te je na primjeru tramvajskog sustava Grada Osijeka prikazan utjecaj promjene kvalitete geometrije tramvajskog kolosijeka na brzinu putovanja tramvajskog vozila, odnosno na promjenu prometne ponude te posljedično na prometnu potražnju.

## 2 Modeli predviđanja brzine (vremena) putovanja

Na tračničkim se sustavima procjena brzine putovanja duž dionica kolosijeka temelji na smanjenju projektne brzine uslijed osnovnih otpora trase i vozila, s obzirom na planirano ili zatečeno stanje kolosijeka i voznog parka, te dodatnih otpora koji se povremeno javljaju duž trase, a izražavaju se kroz vremenske gubitke vozila na stajalištima (otpori stajališta) i ispred signala za regulaciju prometa (otpori raskrižja).

Razvojem računalnih programa i komunikacijskih sredstava, grubo predviđanje vremena putovanja javnim prijevozom pri osmišljavanju učinkovitog planiranja putovanja u sve težim prometnim uvjetima dobiva sve više na važnosti. Do danas su razvijeni brojni novi pristupi o predviđanju brzine i vremena putovanja koji se uglavnom oslanjaju na različite statističke modele ili tehnike strojnog učenja. Modeli predviđanja vremena putovanja dijele se u tri glavne skupine: jednostavni modeli koji se temelje na povijesnim podacima, odnosno na opservaciji da su vremena putovanja ponovljiva između dana, u isto vrijeme dana i istog dana u tjednu (1); statistički modeli koji koriste utjecajne parametre kao nezavisne varijable i predviđaju vrijeme ili brzinu putovanja na temelju njihovih statističkih distribucija i korelacija (2); modeli strojnog učenja (neuronske mreže, strojevi za vektorsku podršku i hibridni modeli)

koji provode proces učenja na postojećim podacima o vremenu putovanja kako bi pronašli odgovor za nepoznate ulazne podatke (3) [1].

Najnovija istraživanja identificirala su nepouzdanost u vremenima zadržavanja tramvaja na stajalištu kao osnovni problem pri modeliranju putovanja u suvremenim tramvajskim sustavima [2]. Međutim, studije o vremenu zadržavanja tramvaja na stajalištima koje su provedene kako bi se utvrdile uzročno-posljedične veze, tj. na koji način na to vrijeme utječe niz utjecajnih parametara, još uvijek su malobrojne [3] i daju dvosmislene rezultate. Istraživanja o vremenima zadržavanja na stajalištima pokazala su da vrijeme zadržavanja na stajalištu ovisi o količini putničkog prometa na stajalištu, količini izmjene putnika, kapacitetu stajališta, visini poda i širini vrata vozila, vremenu potrebnom za otvaranje i zatvaranje vrata, dužini vozila te sustavu naplate vozarine tj. vremenu koje putnici provode kod vozača, dobu dana (prometno vršno ili izvanvršno razdoblje), lokaciji stajališta (unutar ili izvan gradskog središta, udaljenost stajališta od putnicima interesantnih lokacija), a na njega utječu i vremenske prilike. Također, postoji manjak operativne simetrije između pravaca linije: stajališta različitih smjerova iste linije pokazuju različite trendove vremena zadržavanja [4, 5]. Postoje značajne razlike između vremena zadržavanja tramvaja sa prikolicom i bez nje, zbog neujednačene raspodjele kretanja putnika i opterećenja putnicima. Također, opažene su velike poteškoće u tramvajskom prometu ako stajalište opslužuju tramvaji različitih duljina. Ako se razmak između tramvaja strogo ne kontrolira, vrlo je vjerojatno da će kraći tramvaji biti jako opterećeni putnicima i stoga voziti sporije od duljih [6]. Raspodjela putnika duž stajališnog perona ovisi o njegovoj izvedbi i ima značajan utjecaj na vrijeme izmjene putnika. Većina putnika već pri čekanju vozila na stajalištu zauzima poziciju koja odgovara lokaciji vrata kroz koja će u budućnosti izaći iz vozila, a to dovodi do vrlo izražene nejednake raspodjele putnika duž stajališta i preopterećenja pojedinačnih tramvajskih vrata, što značajno produžuje putovanje [7].

Navedene nepouzdanosti u graničnim vrijednostima vremena zadržavanja na stajalištu predstavljaju velik problem na dugim linijama javnog prijevoza s uzastopnim stajalištima na malim udaljenostima, uobičajenim na tramvajskim sustavima. Što je veći broj stajališta, veća je nepouzdanost vremena zadržavanja, a nepouzdanosti vremena zadržavanja na svakom stajalištu će se zbrajati i tako znatno utjecati na pouzdanosti vremena dolaska vozila na sljedeću stanicu. Dodatno, vrijeme čekanja vozila na raskrižju znatno utječe na vrijeme putovanja. Suvremeni tramvaji obično su duži od 20 m, a duže vozilo znači i duže vrijeme prolaska vozila kroz raskrižje. Vrijeme prolaska i vremenski razmak vozila različiti su za različite tramvaje i ovisе o njihovoj brzini i ubrzanju, ali i o oblikovnoj geometriji raskrižja, uvjetima prometne signalizacije, prometnim karakteristikama tokova na raskrižju, rangu ulica koje čine raskrižje i periodu dana [2]. Pregled stanja područja pokazao je kako na pouzdanost modela i predviđanja brzine putovanja javnog gradskog prijevoza utječe mnogo utjecajnih parametara. Mali broj

modela stvorenih za izračunavanje brzine putovanja tramvajima koristi niz pretpostavki, pojednostavljenja i ograničenja. U tim su modelima različiti utjecajni parametri, koji utječu na kretanje tramvaja, sažeti i/ili zanemareni s obzirom na dostupnost podataka iz sekundarnih izvora, kao i metode te uređaje koji su korišteni za prikupljanje podataka na terenu i naknadnu obradu i analizu podataka. Primjerice, Lückerath i suradnici [8] izradili su model s pretpostavkom da se u svakom trenutku na stajalištu može zaustaviti samo jedan tramvaj, te da su vremena zadržavanja specifična za stanicu i vrstu tramvaja, ali i da su uvijek minimalna. Wang i suradnici [2] pretpostavili su da se brzina putovanja tramvaja može osigurati zasebnim trakovima i da je tada konstantna na cijeloj trasi. Zychowski i suradnici [9] razvili su model u kojem ukupno vrijeme putovanja tramvajem uključuje i vrijeme zaustavljanja i čekanja tramvaja na stanicama i raskrižjima. Lai i Leung [10] predložili su brojne matematičke modele za revidiranje voznog reda tramvaja u stvarnom vremenu, u kojima su pretpostavili da je vrijeme zadržavanja na svakoj od krajnjih stanica minimalno i da se vozni park sastoji od identičnih tramvaja koji se grupiraju u koloni samo pred spremištima.

Dosadašnja istraživanja pokazala su međuzavisnost brzine vožnje tramvaja i geometrije tramvajskog kolosijeka kao osnovne mjere stanja kvalitete kolosijeka [11]. Što je veća brzina tramvaja na dionici kolosijeka, to će napredak degradacije geometrije biti više izražen. Uslijed pogoršanja kvalitete geometrije konstrukcije postupnim smanjivanjem brzine tramvaja nastoji se zadržati inicijalna razina sigurnosti i udobnosti putovanja. Ipak, zbog velikog broja prometnih parametara koji utječu na brzinu tramvaja, stupanj korelacije između brzine putovanja i degradacije kvalitete geometrije (kao konstrukcijskog parametra otpora trase) nije jednoznačno utvrđen.

### 3 Ocjena kvalitete geometrije tramvajskog kolosijeka

Pregledom stanja područja nisu pronađena istraživanja u kojima bi se pokušao uključiti utjecaj degradacije kvalitete tramvajskih kolosijeka (tj. postupno povećanje komponente otpora kolosijeka tijekom uporabe) na brzinu kretanja tramvaja, najvjerojatnije zbog sljedećih činjenica:

1. Postoji desetak različitih pristupa obradi podataka mjerenja geometrije kolosijeka radi uvida u stanje kvalitete, no kriteriji za ocjenjivanje kvalitete dani su najčešće za klasične željezničke sustave i razlikuju se između uprava [12];
2. Iako je razvoj procesa prikupljanja i pohrane velikog broja povijesnih podataka o geometriji kolosijeka prouzročio razvoj velikog broja različitih pristupa modeliranja njihove degradacije, modeli se uglavnom usredotočuju na pojedinačni element tračničkog sustava, a njihovi rezultati se oslanjaju na ograničeni broj parametara i razmatraju samo jedan od mnogih aspekata degradacije kolosijeka. Zbog toga ne mogu pružiti temeljitu naznaku svih utjecajnih parametara i njihove uloge u degradaciji kolosijeka [13];

3. Istraživanja koja se bave razvojem kriterija za ocjenjivanje kvalitete i modela degradacije geometrije tramvajskih kolosijeka, koji se konstrukcijski i eksploatacijski znatno razlikuju od klasičnih željezničkih i metro sustava, iako sve brojnija, još uvijek su u začecima [14], najviše zbog lošeg dokumentiranja povijesnih podataka o sustavima [15].

Prema Europskoj normi 13848-1 [16], ocjena kvalitete geometrije kolosijeka temelji se na analizi pet parametara: širine kolosijeka  $G$ , visinskog odnosa tračnica u pravcu ili nadvišenja u krivini  $C$ , vitoperenju kolosijeka  $T$ , smjeru kolosijeka  $H$  i razini tračnica  $V$ . Prema navedenoj normi, pri ocjeni kvalitete geometrije kolosijeka potrebno je promatrati standardne devijacije izmjerenih parametara geometrije, no prema istraživanju autora [17, 18], ovo nije odgovarajući pokazatelj kvalitete geometrije različitih dionica trase kolosijeka, primjerice između stanica, koji bi mogao poslužiti za holističku analizu i ocjenu učinka kvalitete kolosijeka na brzinu putovanja.

Prema [19], prilikom ocjene kvalitete geometrije kolosijeka potrebno je uzeti u obzir ukupan istodobni učinak svih pet izmjerenih vrijednosti parametara geometrije duž pojedine dionice kolosijeka, tzv. sintetizirani pokazatelj kvalitete geometrije kolosijeka  $W_5$ . To je svojevrsni indeks kvalitete geometrije kolosijeka, bezdimenzijska računrska vrijednost, karakteristična za svaku analitičku dionicu kolosijeka, određena sljedećim izrazom:

$$W_5 = 1 - (1 - W_G) (1 - W_C) (1 - W_T) (1 - W_H) (1 - W_V) \quad (1)$$

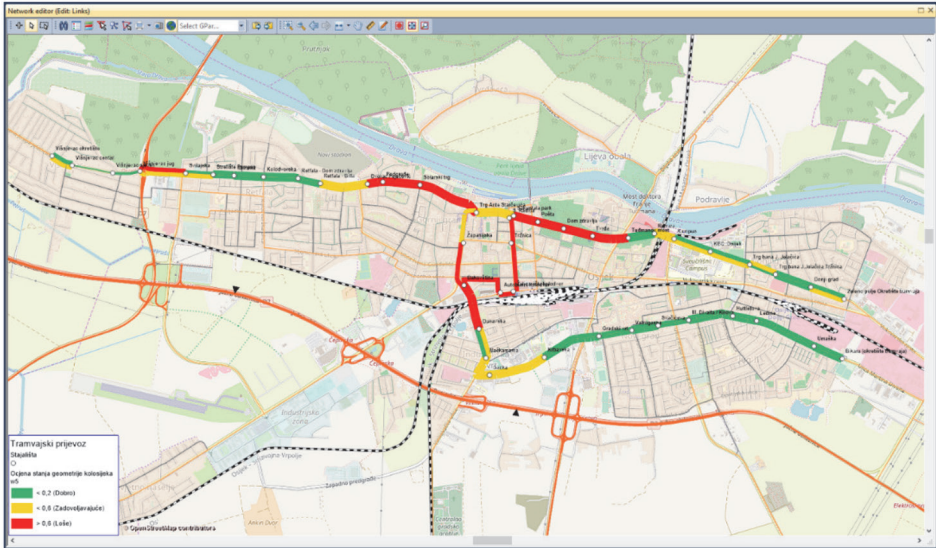
Jednadžba tretira odstupanja pojedinog parametra kao neovisan događaj, gdje  $W_G$  predstavlja pokazatelj kvalitete širine kolosijeka,  $W_C$  pokazatelj kvalitete visinskog odnosa tračnica,  $W_T$  pokazatelj kvalitete vitoperenja kolosijeka,  $W_H$  pokazatelj kvalitete horizontalnih nepravilnosti i  $W_V$  pokazatelj kvalitete vertikalnih nepravilnosti. Ti pojedinačni pokazatelji stanja duž određene dionice definirani su izrazom:

$$W_i = \frac{N_p}{N} \quad (2)$$

gdje  $W_i$  predstavlja pokazatelj stanja kvalitete promatranog parametra geometrije kolosijeka duž analitičke dionice,  $N$  predstavlja ukupan broj izmjerenih vrijednosti promatranog parametra geometrije kolosijeka, a  $N_p$  predstavlja broj izmjerenih vrijednosti promatranog parametra geometrije kolosijeka koje premašuju određenu toleranciju. Zbog toga je taj sintetizirani pokazatelj kvalitete geometrije tramvajskog kolosijeka u ovom istraživanju odabran kao mjerodavan pokazatelj za analizu utjecaja degradacije geometrije kolosijeka na učinke tramvajskog prometnog sustava.







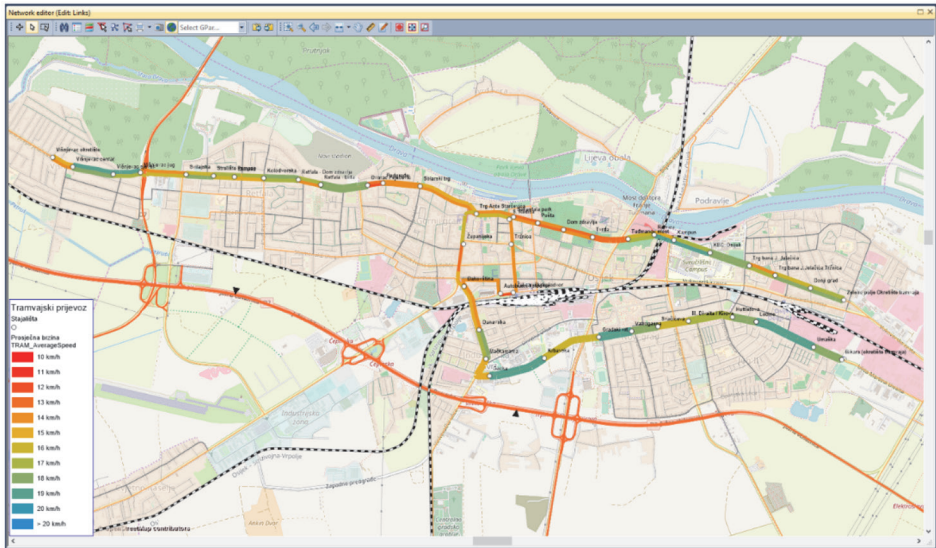
Slika 2. Ocjena kvalitete geometrije tramvajskog kolosijeka

## 4.2 Utjecaj kvalitete geometrije na učinke sustava

Izračun učinaka tramvajskog prometnog sustava proveden je pomoću multimodalnog 4-stupanjskog prometnog modela ponude i potražnje za šire područje grada Osijeka. Primjenom izrađenog modela, operativni pokazatelj „prosječna brzina tramvajskog vozila“ na dionicama između stajališta izračunan je iz omjera dviju mjerljivih varijabli, prijedženog puta i ukupnog vremena putovanja vozila na dionici (uzimajući u obzir i vrijeme stajanja vozila bez obzira na razlog) temeljenog na aktualnom voznom redu. Prikaz prosječnih brzina tramvajskog vozila po dionicama tramvajske mreže na karakterističan radni dan prikazan je na slici 3.

Analizom parametra kvalitete geometrije tramvajskog kolosijeka i operativnog pokazatelja brzine putovanja tramvajskog vozila ustanovljeno je da kvaliteta geometrije kolosijeka utječe na prosječnu brzinu putovanja tramvajskog vozila gdje je na dionicama s dobrim stanjem geometrije kolosijeka prosječna brzina u rasponu od 14 do 19 km/h, dok je na dionicama s lošim stanjem geometrije kolosijeka prosječna brzina kreće u rasponu od 11 do 14 km/h.

Putnički model potražnje izrađen je kao sintetički model EVA metodom. Prometni pokazatelj „broj putnika“ predstavlja sumu svih putovanja tramvajskim prometnim sustavom u promatranom vremenskom razdoblju. Na temelju izračuna broja putnika po dionicama tramvajskih linija ustanovljeno je kako broj putnika u tramvajskom sustavu raste od rubnih područja prema središtu grada te da ne ovisi o prosječnoj brzini tramvajskog vozila.



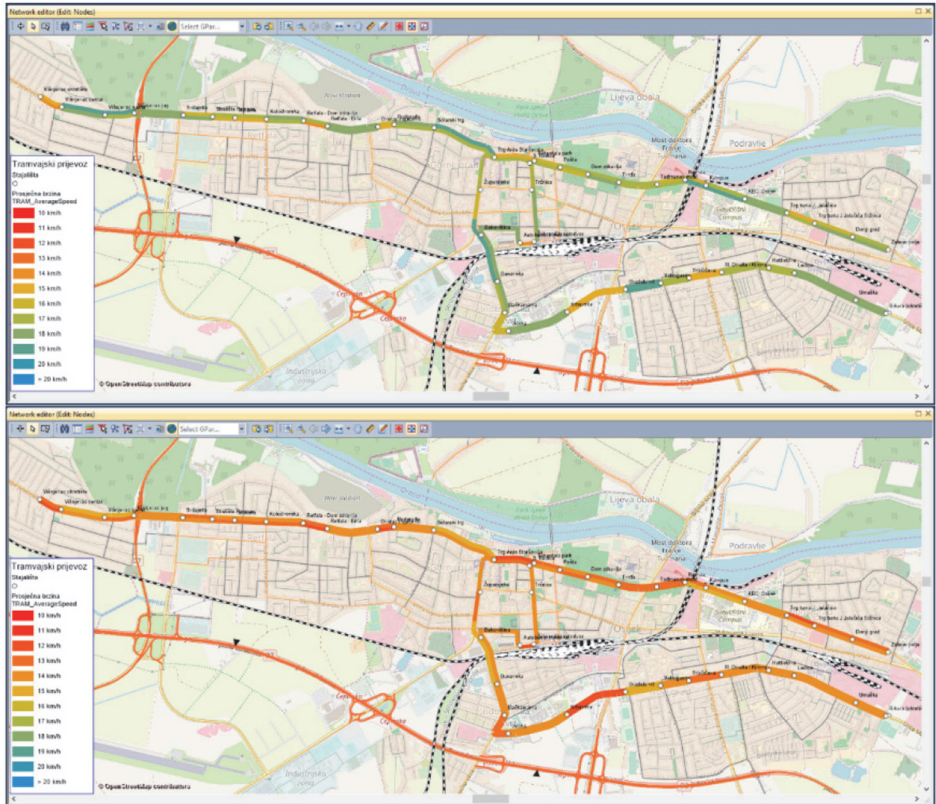
Slika 3. Prosječna brzina tramvajskog vozila po dionicama

### 4.3 Utjecaj degradacije geometrije na učinke sustava

Degradacija geometrije kolosijeka u izravnoj je ovisnosti o građevinskim karakteristikama i kumulativnom statičkom opterećenju konstrukcije [21]. Testiranje utjecaja degradacije kolosijeka na učinke tramvajskog prometnog sustava provedeno je kroz dva prognozna scenarija ponude javnog prijevoza, odnosno za dva granična stanja geometrije tramvajskog kolosijeka:

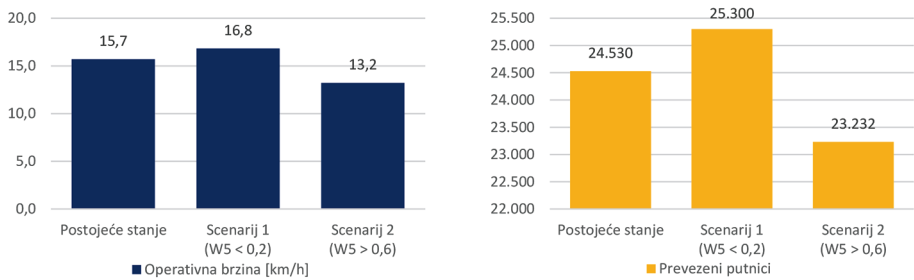
- scenarij 1 – dobro stanje geometrije kolosijeka gdje je  $W_5 \leq 0,2$  i
- scenarij 2 – loše stanje geometrije kolosijeka gdje je  $W_5 > 0,6$ .

Kvaliteta geometrije tramvajskog kolosijeka u oba scenarija modelirana je novim voznim redovima izračunanim na temelju podataka o prostornom rasteru stajališta, ograničenjima najveće dopuštene brzine tramvaja ovisno o stanju geometrije kolosijeka na dionici, karakteristikama tramvajskog vozila te vremenu izmjene putnika na stajalištu. Operativni učinak prosječne brzine tramvajskog vozila na dionicama mreže u oba scenarija prikazan je na slici 4.



Slika 4. Prosječna brzina tramvajskog vozila po dionicama u scenariju 1 (gore) i scenariju 2 (dolje)

Za oba prognozna scenarija izračun prometne potražnje te dodjele putovanja na mrežu temelji se na novoj prometnoj ponudi tramvajskog prometnog sustava. Izračunani prometni i operativni pokazatelji (slika 5.) pokazuju da degradacija geometrije tramvajskog kolosijeka utječe na promjenu prometne potražnje. U odnosu na postojeće stanje tramvajskog prometnog sustava, u scenariju 1, koji predviđa dobro stanje geometrije tramvajskog kolosijeka, prosječna operativna brzina tramvajskog vozila se povećala kao i broj prevezenih putnika. U scenariju 2, koji predviđa loše stanje geometrije kolosijeka, u odnosu na postojeće stanje prosječna operativna brzina tramvajskog vozila se smanjila kao i broj prevezenih putnika.



Slika 5. Usporedba prometnog i operativnog pokazatelja tramvajskog sustava

## 5 Zaključak

Ključan podatak na temelju kojeg se određuje vozni red linije gradske željeznice jest brzina putovanja. Postoje razni modeli predviđanja brzine putovanja koji se uglavnom oslanjaju na različite statističke modele ili tehnike strojnog učenja. Zajedničko velikoj većini modela je to da predviđanje brzine putovanja temelje na samo jednom utjecajnom parametru. Mali broj modela za izračune brzine putovanja koristi veći broj pretpostavki, pojednostavljenja i ograničenja, gdje su različiti parametri koji utječu na kretanje tramvajskog vozila uglavnom sažeti i/ili zanemareni s obzirom na dostupnost podataka kao i na metode i uređaje koji su korišteni za prikupljanje podataka na terenu.

Pregledom literature ustanovljeno je da postoji potreba za unaprjeđenjem procesa modeliranja brzine putovanja javnim prijevozom kroz dopunu znanja o dinamičkim utjecajnim čimbenicima i otporima kretanju tramvaja. Na primjeru analize tramvajskog sustava grada Osijeka utvrđeno je da postoji korelacija između degradacije geometrije kolosijeka i prosječne brzine vožnje tramvajskog vozila. Konačno, budući da je izračun prometne potražnje u izravnoj ovisnosti o prometnoj ponudi tramvajskog prometnog sustava, može se zaključiti da degradacija geometrije kolosijeka izravno utječe na učinke tramvajskog prometnog sustava.

## Literatura

- [1] Altinkaya M., Zontul M., Urban Bus Arrival Time Prediction: A Review of Computational Models, International Journal of Recent Technology and Engineering (Volume-2, Issue-4), 2013.
- [2] Wang B. et al., Segmented Signal Progression Model for the Modern Streetcar System, Discrete Dynamics in Nature and Society, Volume 2015, Article ID 763565, 10 pages, DOI:<http://dx.doi.org/10.1155/2015/763565>, 2015.



- [3] Amirnazmiasfar E., Tramway dwell time estimation and analysis by using multiple linear regression method, *European Journal of Engineering Science and Technology*, 2(1), pp. 36-48, DOI: <http://doi.org/10.33422/EJEST.2019.01.49>, 2019.
- [4] Csiszar C., Sándor Z., Method for analysis and prediction of dwell times at stops in local bus transportation, *Transport* 32(3):302-313, 2017.
- [5] Christoforou Z., Chandakas E., Kaparias I., An investigation of dwell time patterns in urban public transport systems: The case of the Nantes tramway, *Transportation by 2030: Trends and Perspectives*, 8th International Congress on Transportation Research' (ICTR 2017), Thessaloniki, Greece, Sept. 28-29, 14p, <https://eprints.soton.ac.uk/414364/>, 2017.
- [6] Lin T.M., Wilson N.H.M.. Dwell time relationships for light rail systems, *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board* 1361(1361):287-295, 1991.
- [7] Rürger B., Eigner T., Platform infrastructure – influence on passenger behaviour, 5th International Conference on Road and Rail Infrastructure-CETRA 2018, <https://doi.org/10.5592/CO/cetra.2018.684>, 2018.
- [8] Lückcrath D., Ullrich O., Speckenmeyer E., Modelling Timetable based Tram Traffic, *SNE - Simulation Notes Europe (Volume 22, Number 2)*, pp. 61-68, DOI: 10.11128/sne.22.tn.1012, 2012.
- [9] Zychowski A., Junosza-Szaniawski K., Kosicki A., Travel time prediction for trams in Warsaw, Zychowski A., Kurzynski M., Wozniak M., Burduk R. (eds) *Proceedings of the 10th International Conference on Computer Recognition Systems CORES 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 578. Springer, Cham, pp. 53-62, DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-59162-9\\_6](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-59162-9_6), 2017.
- [10] Lai D.S.W., Leung J., Real-time rescheduling and disruption management for public transit, *Transportmetrica B: Transport Dynamics* (6:1 17-33), 2017.
- [11] Ahac M. Mehaničko-empirijski model promjene širine tramvajskog kolosijeka tijekom eksploatacije, *Disertacija*, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, 2013.
- [12] Liu R. et al., Establishment of Track Quality Index Standard Recommendations for Beijing Metro, *Discrete Dynamics in Nature and Society* 2015:1-9, 2015.
- [13] Setiawan D.M., Rosyidi S.A.P., Track Quality Index as Track Quality Assessment Indicator, *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board DOI: 10.3141/2146-14, 2016.
- [14] Elkhoury N., Analysis and Prediction of Tram Track Degradation, *Masters by Research, Engineering*, RMIT University, 2018.

- [15] Madejski, J., Light rail, tram track and turnout geometry measurement and diagnostic tools, in Brebbia, C.A., Wadhwa, L., ed. Urban Transport XI: Urban Transport and the Environment in the 21st Century, WIT Transactions on The Built Environment, 77, pp. 185-195, 2005.
- [16] EN 13848-1: Railway applications / Track – Track geometry quality, Part 1: Characterisation of track geometry
- [17] Krug G.A., Madejski J., Improving track condition by application of quasi cumulative distribution function, 5th International Conference on Road and Rail Infrastructure-CETRA 2018, <https://doi.org/10.5592/CO/cetra.2018.749>, 2018.
- [18] Madejski J., Holistic approach to track condition data collection and analysis, 4th International Conference on Road and Rail Infrastructure-CETRA 2016, <https://master.grad.hr/cetra/ocs/index.php/cetra4/cetra2016/paper/view/550>, 2016.
- [19] Bulletin of the Polish State Railways, Annex to the Order No. 86 of the Polish State Railways (PKO) Headquarters of 14 November 1996: D 75 – Instruction on taking Measurements, Examinations and Assessment of Track Condition
- [20] Analiza stanja tramvajskog kolosijeka na mreži GPP-a Osijek, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, 2016.
- [21] Ahac M., Lakušić S., Madejski J., Haladin I., Application of Osijek's tram tracks geometry analysis results in their reconstruction strategy development, 5th International Conference on Road and Rail Infrastructure-CETRA 2018, DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/cetra.2018.902>, 2018.

# Laboratorijsko i terensko određivanje koeficijenta propusnosti

**Marko Mance<sup>1</sup>, Mladen Cvetković<sup>2</sup>, izv.prof.dr.sc. Danijela Jurić Kačunić<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, mmance@grad.hr

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, mcvetkovic@grad.hr

<sup>3</sup>Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, djka@grad.hr

## Sažetak

Koeficijent propusnosti je vrlo važan parametar tla za projektiranje u geotehnici. Propusnost tla može varirati, ovisno o vrsti tla, i do deset redova veličine i teško se može precizno izmjeriti. Za određivanje propusnosti tla, ključno je poznavati osnovne zakone tečenja vode u tlu. Danas postoje različite terenske i laboratorijske metode kojima se izravnim ili neizravnim putem može odrediti koeficijent propusnosti tla. U ovom radu su prikazane odabrane metode određivanja koeficijenta propusnosti pomoću granulometrijskog sastava tla, pokusa s konstantnim potencijalom u troosnoj ćeliji, pokusa s konstantnom razlikom tlaka u hidrauličkom edometru te pomoću rezultata statičkog penetracijskog pokusa – CPT-a. Naveden je njihov osnovni princip, način određivanja vrijednosti koeficijenta propusnosti te njene prednosti i nedostaci.

*Ključne riječi: koeficijent propusnosti, tečenje vode u tlu, laboratorijska i terenska ispitivanja, ispitivanje s konstantnim potencijalom, hidraulički edometar, CPT, disperzija pornog tlaka*

## Laboratory and field determination of hydraulic conductivity

### Abstract

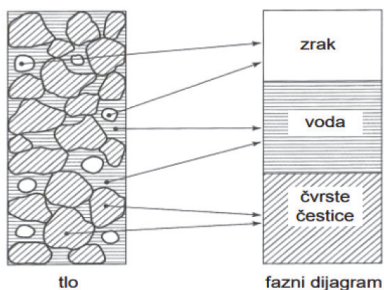
Hydraulic conductivity is a soil parameter that is very important for geotechnical design. Soil permeability can vary by up to ten orders of magnitude, depending on the type of soil, and it can be difficult to measure accurately. To determine the soil permeability, it is crucial to know the basic laws of soil water flow. Various on-site and laboratory methods are currently available for direct or indirect determination of hydraulic conductivity. This paper presents selected methods for determining the coefficient of permeability using the grain size distribution, the constant head test in triaxial cell, the flow pump test in hydraulic oedometer, and the static penetration test (CPT). Their basic principles, the methods for determining hydraulic conductivity, and their advantages and disadvantages are specified.

*Key words: hydraulic conductivity, soil water flow, laboratory and field tests, constant head permeability test, hydraulic oedometer, CPT, dissipation test*



## 1 Uvod

U mehanici tla promatra se tlo kao trofazni materijal sastavljen od zrna i/ili čestica koje tvore skelet tla i pora koje mogu biti ispunjene vodom i/ili zrakom (slika 1.). S obzirom na postojanje pora u tlu, koje čine mrežu pora okruženu čvrstim česticama, tlo ima svojstvo propusnosti kojim je omogućeno tečenje fluida kroz tlo. U geotehničkom inženjerstvu se uglavnom ispituje tečenje vode kroz tlo [1]. Tečenje vode kroz tlo se ostvaruje kada postoji razlika u hidrauličkom potencijalu, i to sa strane većeg hidrauličkog potencijala prema manjem.



Slika 1. Fazni dijagram tla [2]

Propusnost tla se razlikuje za različite vrste tla i uvelike ovisi o veličini čestica u tlu. Na propusnost tla, osim veličine pora kao svojstva tla, utječu i oblik i tekstura zrna, mineraloški sastav tla, koeficijent pora, stupanj zasićenosti tla; struktura i građa tla te viskoznost, gustoća i temperatura fluida koji teče kroz tlo [3]. Također, zbog horizontalne uslojenosti tla, propusnost u horizontalnom smjeru često je znatno veća od propusnosti u vertikalnom smjeru. Okvirne vrijednosti koeficijenta propusnosti za različite vrste tla su prikazane u tablici 1.

Tablica 1. Okvirne veličine koeficijenta propusnosti  $k$  [1].

| Grupa tla | $k$ [m/s]            |
|-----------|----------------------|
| Šljunak   | $10^{-3} - 10^{-1}$  |
| Pijesak   | $10^{-6} - 10^{-3}$  |
| Prah      | $10^{-8} - 10^{-6}$  |
| Glina     | $10^{-10} - 10^{-8}$ |

S obzirom na važnost koeficijenta propusnosti u geotehnici, razvijene su brojne metode, terenske i laboratorijske, kojima se on može odrediti. Prednost laboratorijskih ispitivanja koeficijenta propusnosti je to što se pokusi izvode u kontroliranim uvjetima te su znatno jeftiniji od pokusa koji se obavljaju na terenu. Nedostatak ovakvih ispitivanja su problemi tijekom prikupljanja neporemećenih reprezentativnih uzoraka, što rezultati

pokusa ovisi o ljudskom faktoru te su ispitivanja često dugotrajna. Osnovna prednost terenskih ispitivanja u odnosu na laboratorijska jest brzina ispitivanja i činjenica da se pokusi izvode *in-situ* pa su izbjegnuti problemi s vađenjem neporemećenih reprezentativnih uzoraka tla.

## 2 Laboratorijsko određivanje koeficijenta propusnosti

Za neizravno određivanje koeficijenta propusnosti najčešće se koristi granulometrijski sastav tla. Standardne metode za izravno određivanje koeficijenta propusnosti u laboratoriju ovisi o klasifikaciji tla. Tako se za krupnozrna tla zbog veće propusnosti koristi pokus s konstantnim potencijalom, a za sitnozrna tla pokus s promjenjivim potencijalom. Koeficijent propusnosti za sitnozrna tla može se pouzdanije izravno odrediti pomoću ispitivanja u hidrauličkom edometru primjenjujući tzv. "flow pump test".

### 2.1 Određivanje koeficijenta propusnosti pomoću granulometrijskog sastava tla

Pokušaji povezivanja koeficijenta propusnosti i granulometrijskog sastava tla traju više od 130 godina. Ti pokušaji zasnivaju se na teoretskim razmatranjima i empirijskim izrazima nastalih provođenjem niza pokusa i uspostavljanjem korelacijskih odnosa. Prve pretpostavke za povezivanje koeficijenta propusnosti i granulometrijskog sastava tla temelje se na tome da propusnost tla treba biti povezana s kvadratom nekog karakterističnog promjera pora, odnosno zrna tla [4]. Vodeći se tim pretpostavkama, prvi empirijski izraz za određivanje koeficijenta propusnosti daje Hazen 1892. godine, koji se može smatrati temeljem za nastanak ostalih empirijskih izraza za određivanje koeficijenta propusnosti *k* pomoću granulometrijskog sastava tla [5]:

$$k = C \cdot d_{10}^2 \text{ [cm/s]} \quad (1)$$

gdje je:

*C* - Hazenov empirijski koeficijent materijala (1.0 do 1.5) i

*d*<sub>10</sub> - promjer zrna od kojeg je 10 % zrna tla manje (mm).

Hazen je pretpostavio da koeficijent propusnosti ovisi jedino o kvadratu promjera karakterističnog zrna *d*<sub>10</sub> [3]. Međutim, Shepherd je 1989. ustanovio da se ne radi o kvadratnoj vezi, već da eksponent u Hazenovom izrazu može biti od 1,11 do 2,05, a da je konstanta *C* najčešće između 0,05 i 1,18, ali da se može dostići i vrijednost do 9,85 [6]. Ispitivanjem na različitim tlima pokazalo se da koeficijent propusnosti, osim o veličini karakterističnog zrna, ovisi i o koeficijentu pora. Vrijednost koeficijenta pora u izrazu za određivanje koeficijenta propusnosti uveo je Kozeny 1927. godine [7], a proširio ga Carman, 1937. [8] i 1956. godine [9]. Velik broj kasnije provedenih ispitivanja na različitim

tlima rezultirao je velikim brojem publiciranih izraza koji u sebi sadrže karakteristični promjer zrna i koeficijent pora. Vuković i Soro (1992.) sažimaju nekoliko empirijskih izraza za koeficijent propusnosti  $k$  te predstavljaju opći izraz koji glasi [10]:

$$k = \frac{g}{\nu} \cdot C \cdot f(n) \cdot d_e^2 \quad (2)$$

gdje je:

- $g$  - gravitacijsko ubrzanje ( $m^2/s$ )
- $\nu$  - kinematička viskoznost ( $m^2/s$ )
- $C$  - koeficijent materijala
- $f(n)$  - funkcija poroznosti  $i$
- $d_e$  - efektivni promjer zrna tla (mm).

Pregled postojećih empirijskih formula za izračunavanje koeficijenta propusnosti iz granulometrijskog sastava tla prikazan je u tablici 2.

**Tablica 2. Pregled empirijskih formula za proračun koeficijenta propusnosti iz granulometrijskog sastava tla [10]**

| Metoda        | Koeficijent C                                       | Funkcija poroznosti $f(n)$                    | Efektivni promjer zrna $d_e$   | Područje primjene  |
|---------------|---|---|--|--|
| HAZEN         | $6 \cdot 10^{-4}$                                   | $[1+10(n-26)]$                                | $d_e = d_{10}$   | $0,1 \text{ mm} < d_e < 3 \text{ mm}$ , $U < 5$            |
| SLICHTER      | $1 \cdot 10^{-2}$                                   | $n^{3,287}$                                   | $d_e = d_{10}$   | $0,1 \text{ mm} < d_e < 3 \text{ mm}$ , $U < 5$            |
| TERZAGHI      | $10,7 \cdot 10^{-3} > C$<br>$C > 6,1 \cdot 10^{-3}$ | $\left(\frac{n-0,13}{\sqrt[3]{1-n}}\right)^2$ | $d_e = d_{10}$   | Krupnozrnati pijesak                                       |
| BEYER         | $6 \cdot 10^{-4} \log$                              | 1   | $d_e = d_{10}$   | $0,06 \text{ mm} < d_e < 0,6 \text{ mm}$ ,<br>$1 < U < 20$ |
| SAUERBREI     | $3,75 \cdot 10^{-3}$                                | $\frac{n^3}{(1-n)^2}$                         | $d_e = d_{17}$   | Pjeskovita tla $d_e < 0,5 \text{ mm}$                      |
| KRUGER        | $4,35 \cdot 10^{-5}$                                | $\frac{n}{(1-n)^2}$                           | $\frac{1}{d_e} = \sum \Delta g_i \frac{2}{d_i^g + d_i^d}$  | Srednjezrnati pijesak<br>$U > 5$                           |
| KOZENY-CARMAN | $8,3 \cdot 10^{-3}$                                 | $\frac{n^3}{(1-n)^2}$                         | $\frac{1}{d_e} = \sum \Delta g_i \frac{2}{d_i^g + d_i^d}$  | Krupnozrnati pijesak                                       |
| ZUNKER        | $0,7 \cdot 10^{-4} > C$<br>$C > 2,4 \cdot 10^{-4}$  | $\left(\frac{n}{1-n}\right)^2$                | $\frac{1}{d_e} = \frac{3}{2} \frac{\Delta g_i}{d_1} + \sum \Delta g_i \frac{1}{\ln d_i^g - \ln d_i^d} \frac{1}{d_i^d} - \frac{1}{d_i^g}$ | Sitnozrnati i srednjezrnati pijesak                        |
| ZAMARIN       | $8,3 \cdot 10^{-3}$                                 | $\frac{n^3}{(1-n)^2} (1,275 - 1,5n)^2$        | $\frac{1}{d_e} = \frac{3}{2} \frac{\Delta g_i}{d_1} + \sum a_i \ln \frac{d_i^g}{d_i^d}$  | Krupnozrnati pijesak                                       |
| USBR          | $4,8 \cdot 10^{-4} d_{20}^{0,3}$                    | 1   | $d_{20}$   | Srednjezrnati pijesak, $U < 5$                             |

Svi geotehnički istražni radovi uključuju određivanje granulometrijskog sastava tla pa je s obzirom dostupnost uzoraka, određivanje koeficijenta propusnosti iz granulometrijskog sastava pomoću navedenih izraza vrlo često i jednostavno. Primjenjivost tih izraza ovisi o vrsti tla za koju se želi odrediti koeficijent propusnosti, a budući da se temelje na empirijskim istraživanjima, rezultati nisu nužno prenosivi s lokacije na lokaciju [3]. Marčić i dr. 2012. su pokazali da se korištenjem nekih od navedenih formula na istom poroznom materijalu, mogu dobiti vrijednosti koeficijenta propusnosti koji se mogu razlikovati i do 25 puta [11].

## 2.2 Određivanje koeficijenta propusnosti pokusom s konstantnim potencijalom u troosnoj ćeliji

Ovaj pokus se koristi za određivanje koeficijenta propusnosti  $k$  za tla koja imaju propusnost manju od  $10^{-5}$  m/s. Princip ispitivanja je u nanošenju konstantnog tlaka  $p$ , odnosno hidrauličkog potencijala  $h$ , na potpuno zasićeni uzorak koji se nalazi u troosnoj ćeliji. Koeficijent propusnosti se izračunava kada su volumen vode koja ulazi u uzorak i volumen vode koja izlazi iz uzorka jednaki. Rezultat ispitivanja je graf ovisnosti volumena vode  $V$  koja je istekla iz uzoraka i proteklog vremena  $t$ , a protok  $Q$  se računa koristeći ravni dio grafa pomoću izraza

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (3)$$

gdje je:

$\Delta V$  - volumen vode prikupljen u odabranoj vremenskoj intervalu ( $\text{m}^3$ ) i

$\Delta t$  - odabrani vremenski interval (s).

Nametnuta razlika potencijala  $h$  računa se prema:

$$h = \frac{p}{\gamma_w} \quad (4)$$

gdje je:

$p$  - nametnuti tlak  $p$  u spremniku s komprimiranom deaeriranom vodom (kPa) i

$\gamma_w$  - zapreminska težina deaerirane vode ( $\text{kN}/\text{m}^3$ ).

Konačno, koeficijent propusnosti  $k$  se izračunava iz izraza:

$$k = \frac{Ql}{Ah} \quad [\text{m}/\text{s}] \quad (5)$$

gdje je:

$Q$  - protok dobiven omjerom volumena prikupljene vode u odnosu na vremenski interval  $t$

- h - nametnuta razlika potencijala (m)
- l - visina uzorka (m)
- A - površina poprečnog uzorka (m<sup>2</sup>).

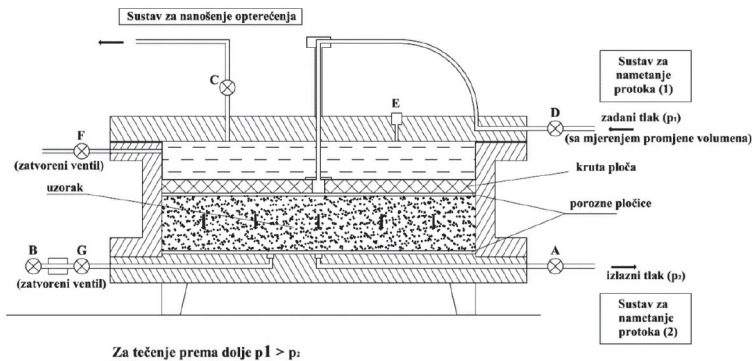
Dobivenu vrijednost koeficijenta propusnosti  $k$  je potrebno korigirati na referentnu temperaturu od 10 °C koja je jednaka prosječnoj temperaturi podzemne vode.



Slika 2. Uređaj s troosnom ćelijom na Građevinskom fakultetu u Zagrebu

### 2.3 Određivanje koeficijenta propusnosti u hidrauličkom edometru

Za razliku od standardnog edometra, hidrauličkim se edometrom, osim izvođenja standardnih edometarskih pokusa, ispitivanja deformacijskih i konsolidacijskih svojstava tla, mogu izvoditi ispitivanja s konstantnim prirastom deformacije ili s konstantnim prirastom opterećenja. Istovremeno je moguće mjeriti volumne i aksijalne deformacije, aksijalno opterećenje te povratni i porni tlak [3]. Brzina i veličina nanošenja opterećenja se kontroliraju računalno, hidrauličnim pumpama. Princip određivanja koeficijenta propusnosti pomoću hidrauličkog edometra je u nametanju protoka kroz uzorak i mjerenju konstantne razlike tlakova na krajevima uzorka. Na ovaj način se koeficijent propusnosti  $k$  može odrediti izravno te takav postupak predstavlja inverznu verziju pokusa s konstantnom razlikom tlaka, tzv. “flow pump test” [12]. Najveća prednost “flow pump testa” u odnosu na test s konstantnom razlikom tlaka je u tome da se protok kroz uzorak može preciznije nametnuti nego mjeriti [13]. Nakon nametanja zadanog protoka kroz uzorak, utiskivanjem tekućine pod konstantnom brzinom, prati se promjena razlike tlaka na krajevima uzorka.



**Slika 3. Određivanje koeficijenta propusnosti pomoću "flow pump testa" [12]**

Koeficijent propusnosti se računa za svaki inkrement opterećenja uz poznate vrijednosti srednjeg hidrauličkog gradijenta  $i$ , specifičnog protoka  $q$  i površine poprečnog presjeka uzorka  $A$ . Izraz pomoću kojeg se računa srednji hidraulički gradijent  $i$  za svaki inkrement opterećenja i konstantnu razliku tlakova na gornjoj i donjoj strani uzorka je:

$$i = \frac{\Delta p}{\gamma_w H} \quad (6)$$

gdje je:

$\Delta p = p_1 - p_2$ ;  $p_1$  i  $p_2$  - zadani ulazni i izlazni tlak (kPa),

$H$  - visina uzorka (m) i

$\gamma_w$  - zapreminska težina vode (kN/m<sup>3</sup>).

Uz poznatu se vrijednost hidrauličkog gradijenta  $i$  izračunava koeficijent propusnosti  $k$  prema izrazu:

$$k = \frac{q}{Ai} \quad [\text{m/s}] \quad (7)$$

gdje je:

$q$  - količina protoka u jedinici vremena,  $q = \Delta Q / \Delta t$

$A$  - površina poprečnog presjeka uzorka (m<sup>2</sup>)

$Q$  - zadani protok (m<sup>3</sup>/s) i

$t$  - vrijeme (s).

Zbog izravnog mjerenja, u potpuno kontroliranim laboratorijskim uvjetima određivanje koeficijenta propusnosti u hidrauličkom edometru može se uzeti kao referentni pokus u odnosu na kojeg se mogu baždariti sva druga ispitivanja. Jedini nedostatak ovog ispitivanja je, kao i kod ostalih laboratorijskih ispitivanja, vađenje neporemećenih uzoraka tla, njihova dostava u laboratorij, čuvanje uzoraka i pažnja pri ugradnji.

### 3 Terensko određivanje koeficijenta propusnosti

Najpoznatiji terenski pokus za određivanje koeficijenta propusnosti je probno crpljenje iz bunara. Crpljenjem određene količine vode iz bunara i mjerenjem sniženja razina podzemne vode u bunaru i pripadajućim piezometrima određuju se hidraulička svojstva vodonosnog sloja tla. Bržu i efikasniju alternativu predstavljaju određivanje koeficijenta propusnosti pomoću rezultata i statičkog penetracijskog pokusa – CPT-a i pokusa disipacije pornog tlaka.

#### 3.1 Određivanje koeficijenta propusnosti pomoću rezultata statičkog penetracijskog pokusa – CPT-a

Većina metoda za procjenu koeficijenta propusnosti tla su skupe i dugotrajne, stoga se teži jednostavnim, brzim i ekonomičnim penetracijskim testovima kao što je CPT. Princip izvođenja statičkog penetracijskog pokusa (Cone Penetration Test, CPT) ogleda se u utiskivanju posebne sonde u tlo određenom brzinom, uz konstantno mjerenje otpora utiskivanju na šiljku sonde ( $q_c$ ), trenja na plaštu sonde ( $f_s$ ), koje se aktivira prilikom utiskivanja sonde između plašta i okolnog tla te pornog tlaka koji nastaje utiskivanjem sonde u tlo ( $u_2$ ). U koherentnim tlima se pri utiskivanju sonde pojavljuje dodatni otpor na šiljku zbog stvaranja dodatnog pornog tlaka pa je potrebno izmjeriti otpor na šiljku  $q_c$  korigirati ( $q_t$ ) prema izrazu (8) [14]. U nekoherentnim materijalima uzima se da je  $q_t = q_c$ .

$$q_t = q_c + u_2(1-a) \text{ [kPa]} \quad (8)$$

gdje je:

$u_2$  - izmjereni porni tlak pri utiskivanju sonde (kPa) i

$a$  - koeficijent neto površine šiljka dobiven kalibracijom u laboratoriju, a može biti između 0,70 i 0,85.

Koristeći tri izmjerene veličine za vrijeme utiskivanja sonde u tlo ( $q_c$ ,  $f_s$  i  $u_2$ ) dugogodišnjim istraživanjima, temeljenim na numeričkoj simulaciji procesa utiskivanja sonde u tlo i usporedbi s rezultatima drugih terenskih i laboratorijskih ispitivanja, uspostavljene su procedure za određivanje profila tla i identifikaciju pojedinih slojeva tla, određivanje fizičkih i mehaničkih karakteristika tla, određivanje parametara tečenja i konsolidacije tla te indicaciju osjetljivosti tla na likvefakciju [15].

Za određivanje koeficijenta propusnosti iz rezultata CPT-a potrebno je izračunati parametre za određivanje identifikaciju tipa tla, normalizirani otpor na šiljku  $Q_{tn}$  i koeficijent trenja na plaštu  $F_r$  prema [15-17]:

$$Q_{tn} = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{p_a} \left( \frac{p_a}{\sigma_{v0}} \right)^n \quad (9)$$

$$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{v0}} \cdot 100\% \quad (10)$$

gdje je:

- $q_t$  - korigirani otpor na šiljku sonde pri utiskivanju u tlo (kPa)
- $f_s$  - trenje izmjereno na plaštu sonde pri utiskivanju sonde u tlo (kPa)
- $\sigma_{v0}$  - vertikalno totalno naprezanje u tlu (kPa)
- $\sigma'_{v0}$  - vertikalno efektivno naprezanje u tlu (kPa)
- $p_a$  - atmosferski tlak (100 kPa) i
- $n$  - eksponent naprezanja ovisan o tipu tla i veličini naprezanja [18].

Pomoću normaliziranog otpora na šiljku  $Q_{tn}$  i normaliziranog koeficijenta trenja na plaštu  $F_r$  izračunava se indeks tipa ponašanja tla  $I_c$ :

$$I_c = [(3,47 - \log Q_{tn})^2 + (\log F_r + 1,22)^2]^{0,5} \quad (11)$$

Utvrđeno je da se normalizirani otpor na šiljku  $Q_{tn}$  smanjuje dok se normalizirani koeficijent trenja na plaštu  $F_r$  povećava s povećanjem udjela sitnih čestica u tlu [3]. Indeks tipa ponašanja tla  $I_c$  povećava se s povećanjem udjela sitnih čestica pa se prema tome koeficijent propusnosti  $k$  smanjuje [19]. Koeficijent propusnosti  $k$  izračunava se ovisno o vrijednosti indeksa tipa ponašanja tla  $I_c$  prema:

$$k = 10^{(-0,952 - 3,04I_c)} \text{ [m/s]} \text{ za } 1,00 < I_c < 3,27 \quad (12)$$

$$k = 10^{(-4,52 - 1,37I_c)} \text{ [m/s]} \text{ za } 3,27 < I_c < 4,00 \quad (13)$$

Budući da se prilikom izvođenja statičkog penetracijskog pokusa (CPT) utiskivanjem sonde u tlo dobivaju kontinuirana mjerenja po dubini, prednost je određivanja koeficijenta propusnosti CPT-om mogućnost dobivanja kontinuiranih vrijednosti koeficijenta propusnosti po dubini. Nedostatak takvih ispitivanja je činjenica da se radi o neizravnom određivanju koeficijenta propusnosti pomoću već uspostavljenih korelacija koje se temelje na empirijskim istraživanjima te rezultati nisu nužno prenosivi s lokacije na lokaciju.

### 3.2 Određivanje koeficijenta propusnosti pokusom disipacije pornog tlaka

Koeficijent propusnosti može se odrediti pokusom disipacije pornog tlaka. Za vrijeme statičkog penetracijskog pokusa CPTU, u koherentnim tlima, dolazi do povećanja pornog tlaka u okolini sonde. Zaustavljanjem penetriranja sonde, doći će do disipacije dodatnog pornog tlaka i izjednačavanjem pornog tlaka s početnim hidrostatičkim tlakom prije početka pokusa. Brzina disipacije je ovisna o koeficijentu konsolidacije tla, koji je



pak izravno ovisan o krutosti i koeficijentu propusnosti tla [16]. S obzirom na to da se radi o horizontalnom tečenju u tlu, dobiva se koeficijent propusnosti u horizontalnom smjeru  $k_h$ . Polazeći od teorije jednodimenzionalne konsolidacije, koeficijent propusnosti je definiran:

$$k_h = \frac{c_h \gamma_w}{M_s} \quad (14)$$

gdje je:

$c_h$  - koeficijent konsolidacije tla u horizontalnom smjeru ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$M_s$  - modul stišljivosti tla (kPa) i

$\gamma_w$  - zapreminska težina vode ( $\text{kN}/\text{m}^3$ ).

Koeficijent konsolidacije tla izračunava se pomoću pojednostavljenog izraza koji je predstavio Robertson 1992. godine. Prema njemu, koeficijent konsolidacije tla u horizontalnom smjeru je funkcija ovisna o vremenu 50 % konsolidacije  $t_{50}$  [min] očitano u dijagramu promjene pornog tlaka u vremenu dobivenog iz pokusa disipacije pornog tlaka [20].

$$c_h = (1,67 \times 10^{-6}) 10^{(1 - \log t_{50})} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (15)$$

Modul stišljivosti  $M_s$  izračunava se pomoću izraza [18]:

$$M_s = \alpha_M (q_t - \sigma_{v0}) \quad [\text{kPa}] \quad (16)$$

gdje je

$q_t$  - otpor izmjeren na šiljku sonde pri utiskivanju u tlo (kPa) i

$\sigma_{v0}$  - vertikalno totalno naprezanje u tlu (kPa).

Koeficijent  $\alpha_M$  ovisi o vrijednosti indeksa tipa ponašanja tla  $I_c$  i normaliziranom otporu na šiljku  $Q_n$ :

$$\alpha_M = Q_{tn} \quad \text{za } I_c > 2,2, \quad Q_{tn} \leq 14 \quad (17)$$

$$\alpha_M = Q_{tn} \quad \text{za } I_c > 2,2, \quad Q_{tn} > 14 \quad (18)$$

$$\alpha_M = 0,188 \left( 10^{(0,55I_c + 1,68)} \right) \quad \text{za } I_c < 2,2 \quad (19)$$

Koeficijent propusnosti tla može se i izravno, približno, izračunati nakon što je određeno vrijeme 50 % konsolidacije  $t_{50}$  prema [21]:

$$k_h \approx \left( \frac{1}{251t_{50}} \right)^{1,25} \quad [\text{m}/\text{s}] \quad (20)$$

Prednost određivanja koeficijenta propusnosti pokusom disipacije pornog tlaka je ispitivanje u stvarnim terenskim uvjetima i stanju naprezanja u kojima se tlo na ispitivanoj dubini nalazi. Nedostatak je što se radi o neizravnom ispitivanju za koje je potrebno poznavati krutost tla. Krutost tla, odnosno modul stišljivosti se opet neizravno određuje pomoću rezultata mjerenja statičkog penetracijskog pokusa pomoću postojećih korelacija. Također, pokus može biti vrlo dugotrajan jer disipacija pornog tlaka u koherentnim materijalima može trajati i do nekoliko dana, što je za terenske prilike vrlo otežavajuća činjenica.

## 4 Zaključak

Zbog prirode samog tla i nepravilnog rasporeda pora u tlu, odnosno nemogućnosti procjene točne duljine puta koji voda prijeđe kroz tlo, potpuno točnu vrijednost koeficijenta propusnosti je nemoguće izračunati. S vremenom su na temelju iskustva i mnogih istraživanja razvijene metode kojima je, idealiziranjem uvjeta u tlu, moguće procijeniti koeficijent propusnosti  $k$ . Svaka od navedenih metoda ima svoje prednosti i nedostatke, te odabir svake od njih ovisi o dostupnosti uređaja, troškovima, brzini izvođenja i sl. No bez obzira na ograničenja, svaka od obrađenih metoda u radu daje zadovoljavajuće vrijednosti koeficijenta propusnosti tla, čije su vrijednosti u zadovoljavajućem rasponu za potrebe projektiranja u geotehnici.

## Literatura

- [1] Jurić Kačunić, 14. Propusnost tla, Geotehnički laboratorij, URL: [http://www.grad.unizg.hr/predmet/geolab\\_a](http://www.grad.unizg.hr/predmet/geolab_a)
- [2] Szavits– Nossan, V., Strujanje vode kroz tlo, Mehanika tla i stijena, URL: [https://www.grad.unizg.hr/\\_download/repository/5\\_Predavanje\\_MT.pdf](https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/5_Predavanje_MT.pdf)
- [3] Marčić, D., Kovačević, M.S., Cvetković, M.: Ispitivanja koeficijenta propusnosti tla na kanalu za navodnjavanje Biđ-Bosutskog polja, *Dani gospodarenja vodama 2013, Napredak kroz znanost*, Zagreb, pp. 171-200, 2013.
- [4] Seelheim, F., *Methoden zur Bestimmung der Durchlässigkeit des Bodens*, Zeitschrift für analytische Chemie, 19, pp 387-402 (in German), 1880.
- [5] Hazen, A., Some physical properties of sands and gravels. *Massachusetts State Board of Health, Annual Report*, pp 539-556, 1892.
- [6] Shepherd, R.G., Correlations of Permeability and Grain Size. *Ground Water*, 27, no. 5, pp 633-638, 1989.
- [7] Kozeny, J., *Über Kapillare Leitung Des Wassers in Boden*. Sitzungsber Akad. Wiss.Wien Math.Naturwiss.Kl., Abt.2a, 136, pp 271-306 (In German), 1927.

- [8] Carman, P. C., *Fluid Flow through Granular Beds*. Trans.Inst.Chem. Eng.,15, 1937.
- [9] Carman, P.C., *Flow of Gases through Porous Media*. Butterworths Scientific Publications, London. 1956.
- [10] Vukovic, M., and Soro, A. 1992. Determination of Hydraulic Conductivity of Porous Media from Grain-Size Composition. *Water Resources Publications, Littleton, Colorado*.
- [11] Marčić, D., Krstanović, D. and Cvetković, M., Usporedba laboratorijskih i terenskih ispitivanja koeficijenta propusnosti tla na području silosa za šećer u Županji, *Sabor hrvatskih graditelja*, 2012.
- [12] Head, K.H., *Manual of Soil laboratory testing*, vol. 3, Effective stress tests, Chicester: John Wiley and Sons, 1998.
- [13] Aiban,S.A., Znidarčić.D., Evaluation of the flow pump measurements, *Geotechnique* 39, 4, pp 655-666, 1989.
- [14] Robertson, P.K., Cabal, K.L., *Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering*, Gregg Drilling & Testing Inc., 5th Edition, 2012.
- [15] Lunne, T., Robertson, P.K., Powell, J.J.M., *Cone penetration testing in geotechnical practice*, Blackie Academic, EF Spon/Routledge Publ., New York, 1997.
- [16] Robertson, P.K., *Soil classification using the cone penetration test*, Canadian Geotechnical Journal, 27(1), pp 151-158, 1990.
- [17] Robertson, P.K., Estimating in-situ soil permeability from CPT and CPTu, 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, CA, Vol.2., pp 535-542, 2010.
- [18] Robertson, P.K., *CPT interpretation—a unified approach*, Canadian Geotechnical Journal, 46, pp 1-19, 2009.
- [19] Cetin, K.O., Ozan, N.S., CPT-Based Probabilistic Soil Characterization and Classification, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol. 135, no.1, pp 84-107, 2009.
- [20] Robertson, P.K., Sully, J.P., Woeller, D.J., Lunne, T., Powell, J.J.M., Gillespie, D., Estimating coefficient of consolidation from piezocone tests Canadian Geotechnical Journal, Ottawa, 29(4), pp 539-550, 1992.
- [21] Parez L., Fauriel R., *Advantages from piezocone application to in-situ tests*, R'évue Française de Géotechnique, 44, pp 13–27 (in French), 1988.

## Energy efficiency of buildings in Kosovo

**Arta Sylejmani<sup>1</sup>**, doc.dr.sc. **Bojan Milovanović<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Municipality of Prishtina, Kosovo, selimiarta@gmail.com

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, bmilovanovic@grad.hr

### Abstract

The energy efficiency in Kosovo is characterized by a high degree of unsustainability. Figures show high spending on electricity, mostly in household sector. However, the focus of this study is on the intervention and investment in the energy efficiency of public buildings. Such initiative has to meet local requirements on energy efficiency. Nevertheless, the implementation program has been hindered by several obstacles.

This study is aimed at presenting the current situation and measures undertaken to improve the energy efficiency of public buildings. The research was conducted by analysing a set of statistical data and interview results.

*Key words: Kosovo, energy efficiency, investment, interventions, private and public buildings*

## Energetska učinkovitost u zgradama na Kosovu

### Sažetak

Energetsku učinkovitost na Kosovu karakterizira visok stupanj neodrživosti. Podaci pokazuju visoku potrošnju električne energije, najviše u sektoru kućanstava. Međutim, fokus ovog istraživanja je bio na intervenciji i ulaganju u energetska učinkovitost u javnim zgradama. Takva inicijativa treba ispuniti zahtjeva za lokalnih propisa za energetska učinkovitost, međutim, program provedbe doživio je nekoliko prepreka.

Istraživanje se provodi kako bi se prikazao trenutni status inicijative i primjenjene mjere energetske učinkovitosti u javnim zgradama. Istraživanje je provedeno analizom skupa statističkih podataka i intervjuja.

*Ključne riječi: Kosovo, energetska učinkovitost, investicije, intervencije, privatne i javne zgrade*

## 1 Introduction

Energy efficiency is no longer a new term for the public. Over the past four decades, the concept of energy efficiency has been increasingly accepted and used by the society worldwide [1]. But for Kosovo this was considered too utopian: after 1999, it became clear that, while Kosovo has substantial reserves of lignite, its two major electricity generating plants (Kosovo A and Kosovo B) were of obsolete design, insufficient capacity and were poorly maintained [2].

Ninety-seven percent of all energy produced in Kosovo comes from this source and so, if coal reserves run out, Kosovo will essentially no longer be able to produce energy. Planning has also long been underway to develop a new Kosovo e Re power plant to help meet Kosovo's energy demands, although timescales for this project keep slipping [3]. Moreover, investments in energy efficiency in Kosovo, similar to all other investments in general, have been lacking for almost two decades during the period of repression. Due to geopolitical developments, the war and numerous economic problems, Kosovo can arguably be ranked as one of the least developed countries in the region concerning energy efficiency. The absolute majority of houses in Kosovo, including old and new buildings, do not meet energy efficiency standards. Furthermore, a large part of the houses and apartments in Kosovo use electrical energy for heating, as well as inefficient appliances, causing energy efficiency to be at an alarmingly low level. Kosovo authorities have begun planning and drafting public policies related to efficiency, based more on the requests made by the European Union than on the basic needs for energy [4].

On the other hand, the initial legal framework, based on which Kosovo attempted to regulate the problem of Energy Efficiency, was the Law on Energy No. 2004/8 enacted in 2004. In this period of time, and in the scope of continued legal efforts, the issue of Energy Efficiency is addressed by three primary regulations for energy sector: the Law on Energy, the Law on Electricity, and the Law on the Energy Regulator [5]. In 2011, the first Law on Energy Efficiency was approved together with some Administrative Instructions related to this field. In 2018, the new law on Energy Efficiency was also approved.

Before the first law on Energy Efficiency in 2010, the First National Energy Efficiency Action Plan (NEEAP) was approved with the goals of achieving energy saving target of 9% from final energy by 2018. Energy saving in buildings has been proclaimed a key action step to achieve this target [6].

In this respect, Kosovo is facing the challenges of development in the field of Energy Efficiency, and has been receiving assistance from donors such as the European Bank for Reconstruction and Development (EBRD), Budget of Republic of Kosovo (BRK), United States Agency for International Development (USAID), United Nations Development Programme (UNDP), European Commission etc., who invest and

assist the country in various areas but mainly in auditing, legislation and investment in concrete projects such as public buildings. There have been some initiatives and some residential real estate businesses which continue to benefit through bank loans at lower rates, while there has also been some support for citizens who make investments in energy saving.

## 2 Electric energy, misery for postwar Kosovo

According to the World Bank report from 2013, Kosovo is one of the poorest countries in Europe, with almost a third of the population living below the poverty line and one in ten people living in extreme poverty. The average per capita income is about one-tenth that of the EU and Kosovo has one of the highest unemployment rates in Europe [7]. Despite that, Kosovo's lignite reserves are Kosovo's biggest natural resource [8]. It has more than 14 billion tons of lignite reserves, the fifth largest lignite reserves in the world [2]. However, Kosovo cannot produce enough electricity for its residents because the system of incineration and distribution is quite old. In the post-war period, Kosovo has been faced not only with lignite problems but also with the development of fast and uncontrolled construction activity. The practice of avoiding the permitting procedure and development of design documentation has resulted in the use of cheaper materials more suitable materials for investors. Thus the present residential sector in Kosovo accounts for the largest energy consumption, so that only in the first quarter of 2019 this figure goes to 59% [9]. of the total energy consumption. With 67% of households without insulated roofs, 52% without double-glazed windows, and 69% living in privation without insulated walls, there is a clear need to reduce the energy efficiency gap found in the present-day Kosovo context. Still, the issue is exacerbated by the increasing electrical energy demand with the 47.49% rise in 14 years and the inability of the government to tackle this problem head-on [10]. The total floor area of the building stock of Kosovo is estimated at 45 million m<sup>2</sup>, while public buildings occupy a total floor area of just over 2 million m<sup>2</sup> [11].

By 2012, the implementation of energy efficiency measures has started in public institutions and various social sectors that they manage, according to a model that is implemented in the EU member states [3]. Investments are usually made on these concrete projects. The need to achieve mandatory comfort levels in buildings, in line with the EU Directives on the energy performance of buildings, means that renovation of the existing building stock has to be given a high priority in Kosovo. So far little research has been done on energy performance of buildings in Kosovo, and there are no clear energy standards and regulations [12]. Although laws such as the energy performance in buildings or energy efficiency Law are partially in line with the Directives such as No. 2010/31 and 2012/27/EU of the European Parliament

and of the Council on Energy Efficiency, Kosovo still does not have a Building Code and so far many interventions are based on the 1995 JUS ex-Yugoslav standard. U-Values for various building categories according to JUS standard, applied in Kosovo in certain cases, are given in the following table.

**Table 1. Reference U-values for components of buildings in residential sector and for the components of tertiary buildings before and after renovation [9]**

|                          | Construction Period |       |      |      |      |      |      |     |       |      |      |      |      |      |      |     |
|--------------------------|---------------------|-------|------|------|------|------|------|-----|-------|------|------|------|------|------|------|-----|
|                          | 1960-1998           |       |      |      |      |      |      |     | 2002- |      |      |      |      |      |      |     |
|                          | wo*                 |       | Ba   |      | ce   |      | wi   |     | wo    |      | ba   |      | ce   |      | wi   |     |
|                          | before              | after | b.   | a.   | b.   | a.   | b.   | a.  | b.    | a.   | b.   | a.   | b.   | a.   | b.   | a.  |
| Individual houses        | 1.47                | 0.34  | 1.71 | 0.52 | 1.48 | 0.36 | 4.18 | 2.8 | 1.1   | 0.35 | 0.75 | 0.75 | 1.22 | 0.36 | 2.97 | 2.8 |
| BLOCKS up to 3 floors    | 1.07                | 0.34  | 1.71 | 0.53 | 1.21 | 0.36 | 4.18 | 2.8 | 0.84  | 0.84 | 0.95 | 0.52 | 1.16 | 0.36 | 2.8  | 2.8 |
| BLOCKS over 3 floors     | 1.91                | 0.38  | 1.71 | 0.53 | 1.48 | 0.36 | 4.22 | 2.8 | 0.88  | 0.88 | 0.92 | 0.73 | 0.52 | 0.52 | 2.8  | 2.8 |
| Commercial/Industrial    | 1.57                | 0.34  | 1.71 | 0.34 | 1.48 | 0.35 | 4.2  | 2.8 | 1.2   | 0.35 | 0.81 | 0.65 | 1.21 | 0.36 | 2.8  | 2.8 |
| Public building          | 0.9                 | 0.4   | 2.9  | 0.54 | 2.09 | 0.35 | 5.1  | 2.8 | 0.44  | 0.44 | 0.74 | 0.74 | 0.23 | 0.23 | 2.8  | 2.8 |
| Universities and schools | 1.15                | 0.32  | 1.28 | 0.58 | 1.24 | 0.4  | 5.1  | 2.8 | 0.46  | 0.46 | 0.65 | 0.65 | 0.61 | 0.61 | 2.8  | 2.8 |
| Hospitals and HC         | 0.97                | 0.49  | 1.84 | 0.56 | 1.62 | 0.35 | 5.1  | 2.8 | 0.46  | 0.46 | 0.78 | 0.78 | 0.52 | 0.52 | 2.8  | 2.8 |

\*) wo- wall; ba- floor; ce- ceiling, wi- window; b.- before; a.- after

**Table 2. Proposal of Requirements for Energy Performance [14]**

|               |        | 1) BLOCKS - 5 floors<br>(1960-1969) |                 | 2) BLOCKS - 9 floors<br>(1970-1979) |                 | 3) BLOCKS - 11 floors<br>(2000-2017) |                 |
|---------------|--------|-------------------------------------|-----------------|-------------------------------------|-----------------|--------------------------------------|-----------------|
|               |        |                                     |                 |                                     |                 |                                      |                 |
|               | BLOCKS | Current condition                   |                 | Standard improvement                |                 | Advanced improvement                 |                 |
| External wall | 1      |                                     | U = 1.864 W/m²K |                                     | U = 0.327 W/m²K |                                      | U = 0.180 W/m²K |
|               | 2      |                                     | U = 0.677 W/m²K |                                     | U = 0.235 W/m²K |                                      | U = 0.142 W/m²K |
|               | 3      |                                     | U = 0.289 W/m²K |                                     | U = 0.289 W/m²K |                                      | U = 0.180 W/m²K |
| Windows       | 1      |                                     | U = 3.5 W/m²K   |                                     | U = 1.6 W/m²K   |                                      | U = 1.0 W/m²K   |
|               | 2      |                                     | U = 2.8 W/m²K   |                                     | U = 1.60 W/m²K  |                                      | U = 1.0 W/m²K   |
|               | 3      |                                     | U = 1.40 W/m²K  |                                     | U = 1.40 W/m²K  |                                      | U = 1.0 W/m²K   |
| Floor         | 1      |                                     | U = 1.339 W/m²K |                                     | U = 0.316 W/m²K |                                      | U = 0.176 W/m²K |
|               | 2      |                                     | U = 0.90 W/m²K  |                                     | U = 0.344 W/m²K |                                      | U = 0.185 W/m²K |
|               | 3      |                                     | U = 0.338 W/m²K |                                     | U = 0.338 W/m²K |                                      | U = 0.193 W/m²K |
| Roof          | 1      |                                     | U = 4.134 W/m²K |                                     | U = 0.365 W/m²K |                                      | U = 0.160 W/m²K |
|               | 2      |                                     | U = 0.565 W/m²K |                                     | U = 0.221/m²K   |                                      | U = 0.148 W/m²K |
|               | 3      |                                     | U = 0.361 W/m²K |                                     | U = 0.357 W/m²K |                                      | U = 0.189 W/m²K |

Over the years Ministry of Environment and Spatial Planning – MESP has published documents for public hearing, namely the guidelines for implementing minimum energy performance requirements for existing buildings in residential sector. Therefore, concrete examples are presented according to these guidelines: current condition, standard improvement, and advanced improvement, for which the targets are to be revised in 2023. These proposals are given only in the form of guidelines and not as administrative instructions. MESP has provided some of the guidelines through concrete housing projects which are presented in table below.

Although Kosovo Agency for energy efficiency, and the Certification Commission of Energy Auditors and Managers, have been established [3], no certificate for energy performance of buildings has been issued so far. According to the Ministry of Economic Development, Kosovo currently has 52 persons who have been trained and certified as energy auditors [14].

On the national level, in order to achieve the 9% energy saving targets by 2018, Kosovo has been increasingly considering the issue of energy efficiency as an issue of high priority [3]. Thus, the first and second medium-term action plans have already been implemented and foreseen 6% energy savings have been achieved [15]. According to an interview with Mr. Sekiraga about the third intermediary plan for energy efficiency 2016-2018, only 3% remain for full completion of the planned energy savings in 2018. Based on the National Renewable Energy Action Plan of the Republic of Kosovo 2011-2020, Kosovo intend to save 25% of energy until the year 2020 [16]. Until now, the efficiency has only been seen as a target to be met in Kosovo; as an international obligation to be met as part of being Energy Treaty Party for the Establishment of the Energy Community. We have seen less efforts in tackling energy efficiency not just as number and target but as one of the energy sources that can be counted on in future energy projections [17].


### **3 Energy efficiency investments in public buildings**

Buildings use up a great deal of energy to provide comfortable environments for their occupants. Various definitions and descriptions of human comfort are used as the baseline against which building performance is evaluated [18]. Many public buildings in Kosovo are outdated i.e. more than half of buildings were built in the period 1970-1985 and immediate investments are required for their thermal insulation, efficient dual-or triple window glass, and efficient space heating and hot water systems, to maintain the value of the property and to improve the comfort of the building occupants [6]. According to the KAEE, there have been interventions since 2012 to improve energy efficiency in more than 70 buildings from the BRK and various donors [19]. Even though the potential to save energy in the entire building stock in Kosovo is estimated to be about 45% of the total current energy




consumption for these buildings [20], according to Mr. Sekiraqa, the savings of 20% were obtained after implementation of measures for the improvement of energy efficiency in some buildings [19]. The following tables, based on the audit report, give details of measures aimed at improving energy efficiency on three projects monitored by KAEE.


**Table 3. National and administrative institute in Prizren, Kosovo [19]**

| National and administrative institute in Prizren                                  | Year of construction   | Type of building   | Number of floors | General condition | Interventions (2002-2004) |
|---|--|--|------------------|-------------------|---------------------------|
|  | 1974   | Institute - Hospital   | 4                | Relatively good   | Roof and windows          |
|   | Energy efficiency measures implemented   | External walls, roof, lighting, electricity for cooling and heating, pipe insulation, boiler, other electrical equipment |                  |                   |                           |
|   | Total investment in the building where 92,862 Euro, savings 14,618 Euro/year, PBP (simple return funds period) = 5.21 years, IRR (internal rate of return) = 24.6 %, NPV (net present value) = 217,842 Euro. |  |                  |                   |                           |

**Table 4. Municipal Administration in Prizren, Kosovo [19]**

| Municipal Administration in Prizren  | Year of construction  | Type of building   | Number of floors | General condition | Interventions (2010) |
|--|---|--|------------------|-------------------|----------------------|
|  | 80's  | Administrative building  | 5                | Relatively good   | Roof                 |
|  | Energy efficiency measures implemented  | External walls, lighting, electricity for cooling and heating, pipe insulation, boiler, other electrical equipment |                  |                   |                      |
|  | Total investment in the building where 98,044 Euro, savings 12,576 Euro/year, PBP (simple return funds period) = 5.99 years, IRR (internal rate of return) = 24.6 %, NPV (net present value) = 217,842 Euro. Saving 58 [kWh/year/m <sup>2</sup> ] or 28 % |  |                  |                   |                      |

**Table 5. Specialist Ambulance - Hospital in Peja, Kosovo [19]**

| Municipal Administration in Prizren   | Year of construction  | Type of building   | Number of floors | General condition | Interventions (2010) |
|---|---|--|------------------|-------------------|----------------------|
|  | 1978  | Hospital   | 2                | good              | doors, windows, roof |
|   | Energy efficiency measures implemented  | External walls, lighting, electricity for cooling and heating, pipe insulation, boiler, other electrical equipment |                  |                   |                      |
|   | Total investment in the building where 145,240 Euro, savings 20,961 Euro/year, PBP (simple return funds period) = 8.19 years, IRR (internal rate of return) = 16 %, NPV (net present value) = 188,833 Euro. |  |                  |                   |                      |

### 3.1 Activities financed to improve energy efficiency

#### BRK-funded projects:

- Energy audit to public service buildings, for 2011-2016, for each year: € 144,000.00.
- Public Campaign on energy efficiency and RE Sources (RES), for 2011-2016: € 50,000.00 per year.

#### Projects funded by donors / borrowings:

- Supervision, monitoring, verification and evaluation of energy efficiency measures in schools and hospitals in Kosovo (Funded by the European Commission in the amount of 15.6 M Euro. The project has been implemented and measures will be introduced in 63 schools and 2 hospitals).
- Study and implementation of energy efficiency measures in public buildings of the centre level, funded by WBIF (Western Balkans Investment Framework)/WB. The amount of funding is 31 M Dollar: design and bidding documents were prepared for the implementation of energy efficiency measures for the first 19 buildings.
- Implementation of energy efficiency measures in municipal public buildings financed by WBIF/KfW. The amount of financing is 7.5 M Euro.
- Support for the private sector and residential energy efficiency measures, financed by the EBRD, the amount of funding is € 12 M. (Emphasis will be given to private sector, where only the first contracts are made with a commercial bank TEB (value € 5M) and Kosovo Rural Lending KRL (value € 1.5M). The project is in the implementation phase.
- The UNDP have been developing projects to promote energy efficiency and two municipalities were assisted in drafting the Municipal energy efficiency Plans 2014-2020 as well as concrete measures for public lighting in the municipality.
- Five municipalities were assisted through USAID in drafting municipal plans for energy efficiency, while ten municipalities were supported in the implementation of energy efficiency measures [6].

According to the KAEE, most of the initiatives included “soft” measures (technical assistance, awareness, realization of various studies) while the level of implementation of “difficult” projects (i.e. physical investments) has been low [21].

Kosovo has created an energy efficiency fund this year to make it possible to complete energy efficiency measures and, according to the KAEE, energy efficiency measures in public buildings have been implemented since 2010 for 70 buildings, which includes the audit process (lighting, heating, thermal insulation of facades, roof insulation, doors and windows etc.). Most of these buildings are either under con-

struction or are in the process of being monitored. According to relevant interviews, energy efficiency savings realised for these buildings amount to approximately 0.7 ktoe<sup>1</sup> or 56,172,900.00 euros. The KAEE indicates that the proposed measures for improving or reducing energy consumption have in most cases failed to achieve the expected results. This phenomenon occurs for various reasons and a major one is certainly an inadequate description of material characteristics for intervention. Moreover, characteristics of domestic products are not verified since Kosovo has no institution that tests and certifies compliance of products with national standards.

### 3.2 Kosovo energy efficiency and renewable energy projects by world bank

Through the Energy Efficiency and Renewable Energy Project for Kosovo, the World Bank has formulated objectives to:

- reduce energy consumption and fossil fuel use in public buildings through energy efficiency and renewable energy investments
- enhance the policy and regulatory environment for renewable energy and energy efficiency [22].

Some of these projects are presented in Table 6.

**Table 6. List of 6 out of 26 latest projects in Kosovo, related to the World Bank's Energy efficiency and renewable energy project [22]**

| DOCUMENT TITLE  | DATE          | REPORT NO. | DOCUMENT TYPE                            |
|---|---------------|------------|--|
| Invitation for Bids   | June 17, 2019 |            |  |
| REOI for RE support   | June 17, 2019 |            | Notice                                   |
| Disclosable Version of the ISR - Kosovo Energy Efficiency and Renewable Energy Project -P143055 - Sequence No : 10  | June 14, 2019 | ISR36832   | Implementation status and results report |
| Disclosable Version of the ISR - Kosovo Energy Efficiency and Renewable Energy Project - P143055 - Sequence No : 10 | May 4, 2019   | ISR36832   | Implementation status and results report |
| Disclosable Version of the ISR - Kosovo Energy Efficiency and Renewable Energy Project -P143055 - Sequence No : 09  | Nov. 9, 2018  | ISR34316   | Implementation status and results report |
| Kosovo P143055-IDA5508XK Energy- Efficiency and Renewable Energy Project (KEEREP) Dec 31-2017 Audit Report          | Sep. 23, 2018 | AUD0016993 | Auditing document                        |
| Disclosable Version of the ISR - Kosovo Energy Efficiency and Renewable Energy Project - P143055 - Sequence No : 08 | May 11, 2018  | ISR32433   | Implementation status and results report |
| Disclosable Version of the ISR - Kosovo Energy Efficiency and Renewable Energy Project -P143055 - Sequence No : 07  | Dec. 7, 2017  | ISR30472   | Implementation status and results report |

1 1 ktoe = 11630000 kWh. Electricity price for 2018 in Kosovo was 6.9 cent per MWh, 8,141,000 X 6.9 = 56,172,900.00 euros

### 3.3 Concrete actions in the Municipality of Prishtina related to energy efficiency

According to an interview with Prishtina Municipality officials, the capital city of Kosovo has had more opportunities, compared to other municipalities, to benefit from various energy efficiency grants. In this respect, a Memorandum of Understanding was signed with the EBRD in previous month about auditing and preparation of projects for municipal buildings such as schools, HC, kindergartens, etc. and, after completion of this work, the tendering will be carried out by the Municipality of Prishtina. Moreover, the municipality has developed various policies for increasing energy efficiency. In 2015, the Mayor of the Municipality decided to change the procedure of construction permitting, which enables expansion of the construction footprint by 10% compared to the footprint determined in the framework of urban development plans. However, this is subject to fulfilment of eight points defined in the decision (building orientation, greenery, use of renewable sources of electricity and heat such as wind, sun, water etc., use of efficient ventilation and cooling practices, wastewater recycling, wastewater treatment, use of sustainable materials, management of waste). Furthermore, the Municipality of Prishtina does not collect public tax for the thickness of thermal insulation in buildings in the process of issuing construction permits. However, in order to allow investors to apply the most extensive thermal insulation layer on the external façade, the municipality can plan the thermal insulation on the building surface outside the regulation line, as it is not determined by legislation which thickness should be the minimum one. Consequently, to stimulate investors to invest more, the fee for building permits does not include the cost for the area covered by thermal insulation.

This year, the Municipality of Prishtina has also finalized the Prishtina Sustainable Urban Mobility Plan - SUMP project, developed by the company Mott MacDonald. As to private sector, The EBRD has invested more than €225 million in 51 projects in Kosovo [23]. Thank to these bank loans, over 3,100 households in densely populated Kosovo are cutting their energy bills and enjoying more comfort at home after investing in energy-saving improvements through the Kosovo Sustainable Energy Projects (KoSEP) [23].

It was established in an interview that a house owner Mr. Qerimi invested about € 13,000 in 2014 in thermal insulation of the house (15cm) through a Procredit Bank loan. He replaced dual window glass and insulated the roof, consequently saving about 25% of electricity compared to the period before the intervention. Mr. Qerimi stated that “he is very pleased that the house is much warmer and more comfortable” [24].



Figure 1. Home of the Qerimi family before and after the intervention [24]

## 4 Conclusion

The data collected show that Kosovo needs to work harder to improve its professional capacity in the field of energy efficiency. This can be done through recruitment, training, or obtaining expertise from abroad. Therefore, energy efficiency policies should be closely related to relevant regulations, and to activities aimed at increasing awareness of citizens in this area. On the national and local levels, the government and municipalities should create plans for the development, implementation, and monitoring of energy efficiency measures, including finalisation of legal framework for this field.

Moreover, considering interventions for increasing energy efficiency in public buildings based on the findings of the audit report, in my opinion, the cost-benefit analyses and monitoring have not been conducted on a regular basis, which must in fact be done to see exactly where the energy losses occur, and whether the expectation for energy savings has been fulfilled according to the precautionary measures specified in the audit report.

On the other hand, national level authorities need to take concrete actions to enable introduction of certificates for the energy performance of buildings, to accelerate procedures for the adoption of the construction code, and to develop policies for incentives or support to private investments in energy efficiency. For example, lower interest rates on energy efficiency loans are a very good incentive, which would certainly have a positive impact. In addition, the use of local materials in construction creates financial boost and fosters growth of national economy. In my opinion, awareness about the energy efficiency should also be increased in residential sector. However, the policies, programs and incentives leading to a sustainable energy efficiency system remain the most important part of efforts to improve the country's standards in the field of energy efficiency.

## Literature

- [1] P. J. Henry H., *The road to Independence for Kosovo: a chronicle of the Ahtisaari plan*, New York, NY: Cambridge University Press, 2010, p. 243.
- [2] D. H. Jack Butcher, "K 2.0," KOSOVO'S ENERGY 'CRISIS' EXPLAINED, 05 August 2017. [Online]. Available: <https://kosovotwopointzero.com/en/kosovos-energy-crisis-explained> [Accessed 13 April 2019].
- [3] D. C. B. E. a. R. G. Dardan Abazi, "Energy Efficiency in Kosovo: An analysis of the legal framework and its implementation," Institute for Development Policy - INDEP, Prishtina, 2012.
- [4] X. Y. Ming Yang, *Energy Efficiency: Benefits for Environment and Society*, Beijing & Washington, DC: Springer - Verlag London Ltd., 2015, p. 1.
- [5] M. o. E. a. Mining, "Kosovo Energy Efficiency Action Plan(KEEP) (2010-2018): First Kosovo mid-term Energy Efficiency Action Plan," Government, Prishtina, 2011.
- [6] K. E. E. Agency, "Third National Plan of Action for Energy Efficiency (NEEAP) in Kosovo," Ministry of Economic Development, Prishtina, 2016.
- [7] T. W. Bank, "The World Bank," *Energy in Kosovo*, - - 2019. [Online]. Available: <http://www.worldbank.org/en/country/kosovo/brief/energy-in-kosovo> [Accessed 20 May 2019].
- [8] B. B. Stephan Stec, *Energy and Environmental Challenges to Security*, Budapest: Springer, 2007, p. 101.
- [9] K. A. o. Statistics, "Statistikat Ekonomike - Bilanci i Energjisë TM1 2019," Kosovo Agency of Statistics, Prishtina, 2019.
- [10] Eptisa, "National Building Energy Efficiency Study for Kosovo," Eptisa, Prishtina, 2013.
- [11] L. Sconosciuto, "EBRD," *Increasing energy efficiency in Kosovo's buildings*, 15 June 2017. [Online]. Available: <https://www.ebrd.com/news/2017/increasing-energy-efficiency-in-kosovos-buildings.html> [Accessed 28 April 2019].
- [12] A. M. Miranda Rashani, "Energy Performance Assessment of Existing Multi-Family Apartment Buildings in Kosovo," Elsevier, vol. 78, pp. 782-787, 2015.
- [13] M. o. E. Development, "Shtojcat UA nr.14/2012 per promovimin e eficiencies," - 2012. [Online]. Available: [https://mzhe-ks.net/repository/docs/Shtojcat-UA\\_14\\_2012\\_per\\_promovimin\\_e\\_eficiencies.pdf](https://mzhe-ks.net/repository/docs/Shtojcat-UA_14_2012_per_promovimin_e_eficiencies.pdf) [Accessed 26 May 2019].
- [14] M. o. E. a. S. Planning, "Udhëzuesin për Zbatimin e Kerkesave Minimale per Performancën Energjetike ne Ndertesat Ekzistuese ne Sektorin e Banimit," 18 march 2019. [Online]. Available: <http://konsultimet.rks-gov.net/viewConsult.php?ConsultationID=40600>. [Accessed 30 May 2019].

- [15] M. o. E. Development, "Energy Auditors and Managers," ---. [Online]. Available: [https://mzhe-ks.net/repository/docs/Pjesemarresit\\_e\\_trajnuar\\_per\\_Auditore\\_dy\\_grupet.pdf](https://mzhe-ks.net/repository/docs/Pjesemarresit_e_trajnuar_per_Auditore_dy_grupet.pdf) [Accessed 01 June 2019].
- [16] M. o. E. Development, "National Renewable Energy Action Plan of the Republic of Kosovo 2011-2020, Udatet for 2018-2020," Ministry of Economic Development, Prishtina, 2018.
- [17] M. o. E. Development, "Strategjinë e Energjisë e Republikës së Kosovës 2017 – 2026," - March 2017. [Online]. Available: [https://mzhe-ks.net/repository/docs/Strategjia\\_e\\_energjise\\_2017-26\\_.pdf](https://mzhe-ks.net/repository/docs/Strategjia_e_energjise_2017-26_.pdf) [Accessed 20 May 2019].
- [18] NEEAP, "Green Energy Kosovo," Energy Efficiency, - - 2017. [Online]. Available: <https://greener-kosovo.eu/energy-efficiency/#1461674489962-e0b56a33-8e4e31ff-b18> [Accessed 13 May 2019].
- [19] B. Sekiraqa, Interviewee, Works and projects in Kosovo Agency for Energy Efficiency. [Interview]. 07 June 2019.
- [20] M. o. Prishtina, "Prishtinaonline," autobuset-e-rinj-ekologjike-ne-sherbim-te-prishtines-kryeqytetit-te-kosoves, 11 January 2017. [Online]. Available: [shorturl.at/kyBDR](http://shorturl.at/kyBDR) [Accessed 14 May 2019].
- [21] i. f. D. Policy, "Dita ndërkombëtare e Eficiencës së Energjisë: 10 masa të menjëhershme që Kosova duhet t'i ndërmarrë për rritjen e eficiencës së energjisë," 05 March 2018. [Online]. Available: <https://indep.info/wp-content/uploads/2018/03/10-masa-per-Eficience.pdf> [Accessed 07 June 2019].
- [22] IBRD, "Kosovo Energy Efficiency and Renewable Energy Project," The World Bank, 17 June 2019. [Online]. Available: <http://projects.worldbank.org/P143055/kosovo-energy-efficiency-renewable-energy-project?lang=en> [Accessed 25 May 2019].
- [23] K. Anderson, Design Energy Simulation for Architects: Guide to 3D Graphics, New York, NY: Routledge, Taylor & Francis Group, 2014, p. 1.
- [24] V. Qerimi, Interviewee, Investment form Procredit Bank for EE. [Interview]. 20 May 2019.

# Pristup istraživanju prostornog i vremenskog razvoja odbačene kaverne uz riprap zaštitu od podlokavanja

**Antonija Cikojević<sup>1</sup>**, doc.dr.sc. **Gordon Gilja<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zavod za hidrotehniku, [acikojevic@grad.hr](mailto:acikojevic@grad.hr)

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zavod za hidrotehniku, [ggilja@grad.hr](mailto:ggilja@grad.hr)

## Sažetak

Morfodinamički razvoj riječnog korita potencijalno narušava sigurnost mostova te je potrebno periodički iznova procijeniti erozivno djelovanje toka tijekom uporabnog vijeka konstrukcije. Jedna od specifičnosti mostova u Hrvatskoj je izgradnja riprap zaštite od podlokavanja čijom se izvedbom utjecaj erozije propagira nizvodno u korito na mjesto odbačene kaverne. Cilj je ovog istraživanja razviti funkcionalnu zavisnost vremenskog i prostornog razvoja kaverne nastale podlokavanjem oko riprap zaštite i hidrauličkih karakteristika toka pristupom hibridnog modeliranja.

*Ključne riječi: most, podlokavanje, riprap, odbačena kaverna, hibridno modeliranje*

## Research approach for spatial and temporal development of deflected scour hole next to riprap scour protection

### Abstract

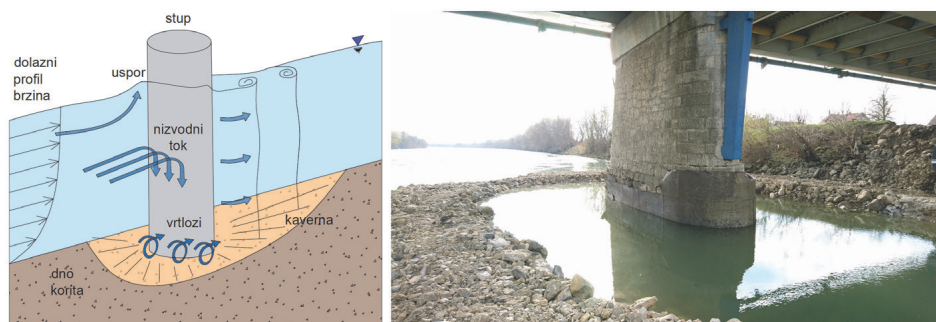
Morphodynamic changes in riverbeds potentially affect the safety of bridges, and therefore erosive capacity in the vicinity of structures needs to be periodically reassessed during the service life of structures. Bridges in Croatia are traditionally protected from scour using the riprap protection, which deflects the scour hole further away from the bridge. The aim of this research is to develop an empirical equation for the spatial and temporal development of deflected scour holes next to riprap scour protection zones using the hybrid modelling approach.

*Key words: bridge, scour, riprap, deflected scour hole, hybrid modelling*



## 1 Uvod

Aluvijalna riječna korita podložna su stalnim morfodinamičkim promjenama uslijed djelovanja vremenski i prostorno promjenjivog režima voda i nanosa, a pod utjecajem prirodnih i antropogenih djelovanja [1]. Morfodinamičke promjene u rijekama najviše dolaze do izražaja u blizini građevina smještenih u vodotoku, najčešće mostova, oko kojih dolazi do erozije koja potencijalno narušava njihovu sigurnost. Izgradnja temelja i stupova mosta u riječnom koritu lokalno utječe na polje tečenja: smanjena je protočnost u mostovskom profilu, lokalno se stvara uspor na stijenka-ma konstrukcije, povećava se intenzitet turbulencije i remeti strujna slika. Posljedica povećanja energije uz stup je podlokavanje i pojava kaverni u njihovoj neposrednoj blizini. U takvim uvjetima stabilnost mosta može biti značajno narušena [2]. Ovom fenomenu su podložnije rijeke s velikim pronosom vučenog nanosa, ponajviše one s pješčanim i šljunčanim koritom, što je slučaj s velikim rijekama u Hrvatskoj [3]. Nedavni poplavni događaji u Hrvatskoj pokazuju značajan utjecaj klimatskih promjena na režim voda koji rezultiraju razornim posljedicama [4], kao i manjkavost tradicionalnih metoda za procjenu mjerodavnih protoka povezanih s nekim povratnim razdobljem [5]. Do sada su na hrvatskim rijekama evidentirane globalne [2] i lokalne [6] promjene u koritu povezane s izgradnjom mostova, identificiran antropogeni utjecaj na režim voda i nanosa te utjecaj na stabilnost temelja stupova mostova. Za procjenu potencijalnog razvoja kaverni oko konstrukcije potrebni su pouzdani ulazni podaci jer dubina podlokavanja ovisi o brojnim hidrauličkim i hidrološkim parametrima: brzini i dubini toka, širini i duljini stupa, granulometrijskoj krivulji dna korita, kutu odklona toka u odnosu na smjer pružanja stupa, lokaciji mosta s obzirom na zakrivljenost rijeke, itd. [7].



**Slika 1. Opstrujavanje oko stupa i proces nastanka kaverne (lijevo, prilagođeno iz [7]); uklanjanje riprapp zaštite od podlokavanja tijekom sanacije temelja stupa mosta (desno)**

Kaverna nastala podlokavanjem nije dugoročno stabilna, već se pri svakom hidrološkom događaju razvija do ravnotežnog stanja ovisnog o trenutačnom režimu voda

i nanosa. Prilikom prolaska većeg vodnog vala kaverna se nastavlja produbljivati jer su zbog veće dubine vode i posmičnih naprezanja te jedinične snage toka stvoreni uvjeti za intenzivnije odnošenje materijala s dna korita [8]. Nakon opadanja vodnog vala kaverna se puni vučenim nanosom i tako se privremeno smanjuje [9]. Zato je potrebno mjerenja hidrauličkih parametara provoditi u mjerodavnim uvjetima, tj. pri nailasku vodnih valova kada su dimenzije kaverni najveće. Mjerenja u ovakvim uvjetima su nepogodna zbog utjecaja naplavina pokrenutih sa sliva na mjernu opremu, kao i povećane dubine i brzine toka što utječe na pouzdanost izmjerenih veličina. Iz tog razloga se najčešće analize vezane uz podlokavanje provode u kontroliranim, laboratorijskim uvjetima, a točnost rezultata se verificira s povremenim terenskim mjerenjima.

Većina dosadašnjih istraživanja bila je usmjerena na određivanje dubine podlokavanja oko stupova mostova smještenih u korito [10], pri čemu se izračunane dimenzije kaverne koriste za projektiranje zaštite od podlokavanja. Prilikom projektiranja često se predviđa izvedba riprapp zaštite od podlokavanja zbog niza prednosti kao što su cijena, jednostavnost izvedbe, prilagodljivost uvjetima na terenu i lako održavanje [11]. U praksi se pokazalo da najčešće tijekom i nakon izgradnje riprappa dolazi do pojave kaverni na nizvodnoj nožici riprappa nakon čega se ono počinje urušavati u novonastalu odbačenu kavernu [12]. Budući da pojava odbačenih kaverni u koritu posredno ugrožava stabilnost mosta, može se zaključiti da riprapp ne rješava problem podlokavanja nego ga samo pomiče nizvodno pri čemu je položaj kaverne nepoznanica jer se formira u interakciji toka i građevine u uvjetima specifičnim za svaku lokaciju. Uzevši u obzir da su istraživanja urušavanja riprappa zaštite rijetka, a nedavna istraživanja upućuju na potrebu proširivanja znanja iz tog područja [13], predmet ovog istraživanja bit će problem podlokavanja oko već izvedene riprappa zaštite mosta i izrada metodologije za njegov pouzdani izračun na temelju karakteristika polja tečenja. Cilj je unaprijediti empirijske zavisnosti za određivanje ravnotežnih karakteristika kaverne nastale podlokavanjem oko riprappa zaštite. U tu svrhu primijenit će se pristup hibridnog modeliranja koji obuhvaća ispitivanja na fizičkom modelu (faza I) i numeričke simulacije (faza II) čiji će se združeni rezultati koristiti za analizu funkcionalne zavisnosti vremenskog i prostornog razvoja kaverne i hidrauličkih karakteristika toka.

## 2 Pregled stanja

Terenska istraživanja podlokavanja su vremenski zahtjevna, potrebna je specijalizirana oprema te ovise o trenutku nailaska i trajanju vodnog vala, što unosi niz nepoznanica u istraživanje. Iz tog razloga većina istraživanja je provedena u laboratorijskim uvjetima pri čemu se pokazalo da se rezultati ne mogu vjerno preslikati u prirodu [14]. Empirijske zavisnosti proizašle iz ovakvih istraživanja davale su pro-

cjenu dubine podlokavanja oko nezaštićenih stupova i kao rezultat se izvodila zaštita od podlokavanja, od kojih je jedna od najraširenijih metoda riprap zaštita [11]. Istraživanje urušavanja riprap zaštite u kavernu i povezane opasnosti za stabilnost i sigurnost mosta rijetko su istraživane, uključujući riprap u obliku kakav se tradicionalno primjenjuje u Hrvatskoj [15].



**Slika 2. Riprap zaštita od podlokavanja savskog mosta u Jasenovcu, pogled nizvodno prema stupu (lijevo) i detalj iste lokacije (desno)**

Do značajnijeg napretka u istraživanju podlokavanja dolazi nakon naglog razvoja hidroakustičke opreme, kao i numeričkih modela za opisivanje karakteristika polja tečenja krajem 20. stoljeća. Nedavna istraživanja preporučaju upotrebu daljinskog mjerenja za praćenje podlokavanja uz pomoć raznih tipova senzora, no uglavnom se temelje na sensorima koji su pričvršćeni na most i zahtijevaju poznavanje točne lokacije na kojoj će se pojaviti kaverna, a u protivnom nisu upotrebljivi [16-18]. Zaid i dr. [19] razvili su numerički model temeljen na podacima iz prethodno provedenih eksperimenata. Osnovna svrha izrade modela je bila analizirati karakteristike turbulentnog polja brzine oko kružnog stupa i procjena povećanja posmičnog naprezanja na dno korita oko stupa mosta. Odgovarajući numerički rezultati dobro se slažu s rezultatima dobivenim iz dostupnih eksperimentalnih podataka. Guven i Guna [20] razvili su hibridni model za simulaciju vremenskog razvoja kaverne i pripadnog polja tečenja nad njim. Hibridni model su verificirali eksperimentalnim podacima preuzetim iz literature. Vremenski razvoj kaverne simuliran hibridnim modelom pokazao je dobro poklapanje s eksperimentalnim podacima u uvjetima izražene turbulencije. Iskustva dobre prakse numeričkog modeliranja također se mogu usvojiti iz rada Hunga i Yaua [21] koji su ispitivali osjetljivost podlokavanja oko stupova mostova u uvjetima velikih voda.

### 3 Metodologija

Pojava poplava je relativno česta u prirodi, no intervali njezinog pojavljivanja nadilaze uobičajeno razdoblje potrebno za provođenje znanstvenog istraživanja. Mjerenje hidrauličkih parametara u stvarnim uvjetima tijekom nailaska vodnih valova pod kojim dolazi do značajnog razvoja kaverne nužno je za razumijevanje morfodinamičkog razvoja korita u blizini građevina, no istovremeno i opasno zbog velike snage vode u blizini građevina. Iz tog razloga su podaci s terenskih mjerenja rijetki i ne obuhvaćaju dovoljan raspon hidrauličkih parametara. Stoga je za opis pojave podlokavanja u prirodi potrebno replicirati uvjete u manjem mjerilu koje omogućava simuliranje željenih uvjeta u modelu. U tu svrhu koristit će se laboratorijska ispitivanja na fizičkom modelu smještenom u hidrauličkom kanalu. Adekvatno mjerilo modela odredit će se na temelju postojećih snimanja mostova u Hrvatskoj i predstavljaju pogodne studije slučaja. Na temelju podataka snimljenih terenskim mjerenjima verificirat će se fizički model na način da se potvrdi mjerilo modela, protok crpke koja simulira tečenje te hrapavost korita i pripadna krupnoća nanosa riječnog korita koji repliciraju stvarne uvjete u prirodi.

Mjerenje karakteristika polja brzine i batimetrije riječnog korita planira se izvesti u stvarnim uvjetima tijekom poplava na lokacijama pilot-istraživanja. Mjerenje polja brzine bit će izvedeno pomoću akustičnog strujomjera ADCP i višesnopnog dubinomjera ODOM ES3 koje posjeduje Građevinski fakultet montiranih na brodicu. Rezultat mjerenja bit će oblak točaka dna riječnog korita s pripadnom geopozicijom i karakteristikama trenutačne brzine toka kroz cijeli vodni stupac diskretiziran u ćelije. Građevinski fakultet u Zagrebu ima dugu tradiciju razvoja algoritama za obradu ovakvog tipa podataka [22].

Mjerenje karakteristika polja brzine u fizičkom modelu bit će izvedeno pomoću akustičnog strujomjera prikladnog za laboratorijska ispitivanja, ADV Vectrino (engl. Acoustic Doppler Velocimetry), a batimetrija korita laserskim 3D profilerom. Ako u signalu postoje šumovi, potrebno ih je filtrirati čime se smanjuje amplituda frekvencije šuma i poboljšava kvaliteta signala. Prilikom uporabe ADV uređaja emitira se Dopplerov signal čija je razina buke karakteristična bijelom šumu. Dobar pokazatelj pouzdanosti podataka je parametar SNR (engl. Signal to Noise Ratio) koji definira odnos željenog signala prema pozadinskom šumu te korelacijski parametar COR. Kako bi se osigurala kvaliteta zvučnog signala ADV-a, preporuča se da parametri COR i SNR budu veći od 70 % i 15 dB [23]. Prikupljanje podataka laboratorijskim ispitivanjem zahtijeva dugotrajnu pripremu modela kako bi se korito deformiralo do konačnog ravnotežnog stanja u odnosu na hidrauličke rubne uvjete [24]. Stoga se mjerenje batimetrije u fizičkom modelu može izvesti i pomoću laserskog mjerča jer omogućava snimanje batimetrije kroz vodu [25]. Time se hidrotehnički kanal nakon generiranja kaverne ne bi morao prazniti i omogućilo bi se neprekidno prikupljanje podataka u stvarnom mjerilu za vrijeme provođenja pokusa.

Upotrebom numeričkog modeliranja planira se napraviti numerički model u mjerilu prototipa kojim se ispitivanje karakteristika polja brzine i morfodinamičkog razvoja korita može ubrzati u odnosu na fizički model, promatrati veća dionica vodotoka te preuzeti trenutačne vrijednosti polja brzine i batimetrije korita u svakoj točki u svakom vremenskom koraku. Numerički model bit će kalibriran korištenjem podataka s terenskih mjerenja pomoću statističkih metoda u skladu s verifikacijom fizičkog modela. Korištenjem numeričkih simulacija planira se nadopuniti bazu eksperimentalnih podataka izmjerenim fizičkim modelom primjenjujući metodu kompilacije kako bi se dobila dovoljno velika baza podataka za formiranje zaključaka. Ovaj pristup se naziva hibridno modeliranje, a podrazumijeva komplementarno prikupljanje podataka eksperimentalnim fizičkim modelom (I. faza) i numeričkim simulacijama (II. faza), pri čemu svaki od modela svojim prednostima nadopunjava nedostatke drugoga. Hibridno modeliranje je nužno jer se njime mogu istovremeno kvalitetno opisati karakteristike lokalnog polja brzine oko stupa i karakteristika polja tečenja na široj dionici koja je ujedno i rubni uvjet fizičkog modela. Hibridni modeli bit će koncipirani na način da se usrednjene hidrauličke karakteristike preuzimaju iz numeričkog modela, a karakteristike lokalnog polja brzine oko stupa i kaverne preuzmu iz fizičkog modela.

Na temelju generirane baze podataka analizirat će se uzročno posljedična veza između karakteristika toka i razvoja kaverne uslijed podlokavanja [26] definiranjem empirijskih jednadžbi izvedenih upotrebom dimenzionalne analize. Dimenzionalna analiza se temelji na činjenici da se iz mjernih jedinica fizičkih veličina koje djeluju u promatranom sustavu može iznaći fizički zakon. Primjenom dimenzionalne analize nužno je da izvedena jednadžba bude homogena, odnosno svaki član jednadžbe mora imati jednaku jedinicu mjere. To je nužan, ali ne i dovoljan uvjet da jedna empirijska jednadžba bude ispravna. Ispravnost dimenzionalne analize potrebno je dokazati uz pomoć pokusa, a u ovom istraživanju dokazat će se na temelju rezultata laboratorijskih ispitivanja i terenskih mjerenja. Prilikom primjene dimenzionalne analize definirat će se veza između nezavisnih varijabli koje je moguće lako izmjeriti i/ili izračunati i zavisnih koje je potrebno izračunati, pa će tako biti:

- nezavisne hidrauličke varijable: srednja brzina toka  $U$ , srednja dubina toka  $h$ , Froudeov broj  $Fr$ , nagib energetske linije  $I_e$ , posmično naprezanje  $\tau$ , turbulentna kinetička energija  $TKE$ , Reynoldsovo naprezanje  $RS$  i Shieldsov broj  $\Theta$
- nezavisne geometrijske varijable: širina stupa  $a$ , duljina stupa  $L$ , kut otklona u odnosu na tok  $\alpha$ , karakteristični promjer riprapa  $d_R$ , karakteristična širina riprapa  $a_R$ , karakteristični nagib riprapa  $m$
- zavisne varijable: dubina kaverne  $d_S$ , promjer kaverne  $r_S$ , udaljenost kaverne od riprapa  $L_S$ .

Za potrebe definiranja morfodinamičkog razvoja kaverne tijekom nailaska vodnog vala koristit će se valićna analiza za analizu varijabilnosti karakteristika polja brzine i deformacija korita na različitim vremenskim skalama u frekvencijskoj i vremenskoj domeni. Ovaj pristup su već koristili istraživači za bolji opis morfodinamičkih procesa u riječnom koritu [27] i opis razvoja kaverne oko stupova mosta [28] koji će biti implementiran i u ovom istraživanju.

## 4 Rasprava

U Hrvatskoj i u Europi brojni su mostovi pri kraju svog uporabnog vijeka, dok je istovremeno pojava ekstremnih hidroloških događaja, kao što su poplave, pod utjecajem klimatskih promjena sve češća. Poplave utječu na hidromorfološke promjene u koritu rijeke i pojavu podlokavanja koje može narušiti sigurnost mostova. Tradicionalna mjerenja podlokavanja su samo djelomično učinkovita – ako se ne provode u uvjetima nailaska vodnog vala, postoji mogućnost da se kaverna zapuni nanosom nakon poplave i da izmjereni podaci podcijene stvarnu opasnost. Fokus većine dosadašnjih istraživanja bio je na određivanju veličine podlokavanja oko stupova mosta i izvedbi adekvatne zaštite, pristup za koji se u praksi pokazalo da ne predstavlja adekvatnu zaštitu od podlokavanja, već samo odbacuje kavernu nastalu podlokavanjem te često uzrokuje kontraefekt i veće podlokavanje nizvodno u odnosu na stanje bez riprapi. Budući da je dosadašnjim istraživanjem pokazano da se na temelju trenutačno dostupnih jednadžbi može pouzdano odrediti dubina podlokavanja ako se odabere prikladna jednadžba, hipoteza postavljena u ovom istraživanju glasi: ako se stvori baza podataka s dovoljno velikim rasponom hidrauličkih parametara, geometrija riprapi i rezultirajućih dubina kaverne, moguće je definirati empirijsku jednadžbu koja će dati pouzdaniju procjenu prostornog i vremenskog razvoja odbačene kaverne za odabrani hidrološki događaj.

Postavljena hipoteza planira se potvrditi stvaranjem baze podataka pomoću terenskih mjerenja i laboratorijskim ispitivanjem te numeričkim simulacijama koristeći hibridno modeliranje. Rezultat istraživanja bit će nomogrami – grafički prikazi ovisnosti dubine podlokavanja o karakteristikama polja brzine i geometriji riprapi – prikladni za upotrebu prilikom projektiranja. Ti će nomogrami omogućiti procjenu opasnosti od podlokavanja prilikom projektiranja mosta, ili rekonstrukcije u slučaju da se režim voda pod utjecajem klimatskih promjena pokaže opasan za konstrukciju, istraživačima, projektantima i agencijama koje gospodare mostovima na brz, pravovremen i pouzdan način. Doprinos predloženog istraživanja u odnosu na aktualno stanje područja ogleđa se u fokusiranju istraživanja na mostove oko kojih je već izvedena riprapi zaštita od podlokavanja – postojećih građevina čija je stabilnost i s njom povezana sigurnost nepoznanica u hidrauličkom okolišu pod utjecajem klimatskih promjena. Važnost rješavanja navedenog problema je u činjenici da je podlo-

kavanje najčešći uzrok otkazivanja stabilnosti mostova i kao takav predstavlja važan parametar pri projektiranju ili procjeni stanja konstrukcije.

## 5 Zaključak

U ovom radu predstavljena je metodologija istraživanja za određivanje prostornog i vremenskog razvoja kaverne pri zadanim projektnim scenarijima kao što su poplave. Razvoj metodologije za procjenu razvoja kaverne temelji se na podacima o režimu voda i nanosa čime se omogućava procjena opasnosti uzimajući u obzir najvažnije utjecajne varijable. Znanstveni doprinos predloženog istraživanja u odnosu na aktualno stanje područja ogleda se u fokusiranju istraživanja isključivo na problem podlokavanja oko već izvedene riprap zaštite strukture mosta, a ne samo oko pojedinog stupa. Utjecaj predloženog projekta na struku očekuje se kroz razvoj pouzdanijih empirijskih jednadžbi koje su prilagođene za primjenu na velikim rijekama, a za što u trenutačnoj praksi ne postoje dovoljno pouzdane metode koje bi se mogle primijeniti u sustavima gospodarenja mostovima pri procjeni stanja konstrukcije. Pouzdanost dobivenih rezultata uvelike ovisi o kvaliteti ulaznih podataka korištenih u analizama. Kako bi se dobila kvalitetna baza podataka pogodna za istraživanje, primijenit će se pristup hibridnog modeliranja koji podrazumijeva komplementarno prikupljanje podataka eksperimentalnim fizičkim modelom i numeričkim simulacijama. Na ovaj način osigurano je nadopunjavanje svakog modela tako da se manjkavosti pojedinog modela odstrane prednostima drugog te se dosegne tražena pouzdanost ulaznih podataka.

## Literatura

- [1] Lamb, R., Aspinall, W., Odbert, H., Wagener, T.: Vulnerability of bridges to scour: insights from an international expert elicitation workshop, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 17 (2017) 8, pp. 1393-1409
- [2] Gilja, G., Kuspilić, N., Bekić, D.: Utjecaj degradacije korita na sigurnost mostova, *Sabor hrvatskih graditelja 2012: Graditeljstvo - poluga razvoja*, Cavtat, Croatia, pp. 795-806, 2012
- [3] Kuspilić, N., Gilja, G.: *Podvodni pregled mostova*, Sabor hrvatskih graditelja 2016: EU i hrvatsko graditeljstvo, Cavtat, Croatia, pp. 287-300, 2016
- [4] Abdulaj, R., Miković, N., Oskoruš, D., Vujnović, T.: Velike vode donjeg toka rijeke Save tijekom svibnja 2014., *Hrvatska vodoprivreda*, 207 (2014), pp. 14-17
- [5] Gilja, G., Ocvirk, E., Kuspilić, N.: Joint probability analysis of flood hazard on river confluences using bivariate copulas, *Gradevinar*, 70 (2018) 4, pp. 267-275



- [6] Kuspilić, N., Gilja, G.: Influence of watercourse flow on bridge safety, e-Zbornik: Electronic collection of papers of the Faculty of Civil Engineering, 8 (2018) 16, pp. 26-41
- [7] Melville, B.W., Coleman, S.E.: Bridge Scour, Water Resources Publications, 2000
- [8] Tabarestani, M.K., Zarrati, A.R.J.K.J.o.C.E.: Local scour calculation around bridge pier during flood event, 21 (2017) 4, pp. 1462-1472
- [9] Arneson L.A., Zevenbergen L.W. , Lagasse P.F. , P.E., C.: Evaluating Scour at Bridges, Federal Highway Administration (FHWA), pp. 71-73, 2012
- [10] Saha, R., Lee, O.S., Hong, H.S.: A Comprehensive Method of Calculating Maximum Bridge Scour Depth, Water, 10 (2018) 11, pp.
- [11] Lagasse, P.F., Clopper, P.E., Zevenbergen, L.W., Girard, L.G.: Countermeasures to Protect Bridge Piers from Scour, National Cooperative Highway Research Program - Transportation Research Board, Fort Collins, CO, pp. 284, 2007
- [12] Gilja, G., Kuspilić, N., Tečić, D.: Morphodynamic impact of scour countermeasures on riverbed topography, 15th International Symposium Water Management and Hydraulics Engineering, Primošten, Croatia, pp. 176-183, 2017
- [13] Park, W.S., Hwang, H.J., Ahn, J.: Physical Modeling of Spatial and Temporal Development of Local Scour at the Downstream of Bed Protection for Low Froude Number, Water, 11 (2019) 5, pp.
- [14] Vonkeman, J.K., Basson, G.R.: Evaluation of empirical equations to predict bridge pier scour in a non-cohesive bed under clear-water conditions, Journal of the South African Institution of Civil Engineering, 61 (2019) 2, pp. 2-20
- [15] Ji, U., Yeo, W., Kang, J.: Subsidence of riprap protection without filters for different installation types of riprap around a pier in sands, Journal of Hydro-environment Research, 7 (2013) 1, pp. 41-49
- [16] Topczewski, Ł., Cieśla, J., Mikołajewski, P., Adamski, P., et al.: Monitoring of Scour Around Bridge Piers and Abutments, Transportation Research Procedia, 14 (2016) pp. 3963-3971
- [17] Briaud, J.-L., Hurllebaus, S., Chang, K.-A., Yao, C., et al.: Realtime monitoring of bridge scour using remote monitoring technology, Texas Department of Transportation, Texas, US, pp. 440, 2011
- [18] Prendergast, L.J., Gavin, K.: A review of bridge scour monitoring techniques, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 6 (2014) 2, pp. 138-149
- [19] Zaid, M., Yazdanfar, Z., Chowdhury, H., Alam, F.: Numerical modeling of flow around a pier mounted in a flat and fixed bed, Energy Procedia, 160 (2019) pp. 51-59



- [20] Guven, A., Gunal, M.: Hybrid modelling for simulation of scour and flow patterns in laboratory flumes, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 62 (2010) 3, pp. 291-312
- [21] Hung, C.-C., Yau, W.-G.: *Vulnerability evaluation of scoured bridges under floods*, 2017
- [22] Gilja, G., Kuspilić, N., Brckan, B.: Computer algorithm for analysis of bedform geometry, *13th International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering*, Bratislava, Slovakia, pp. 129-138, 2013
- [23] Baki, A.B.M., Z. Zhu, D., Rajaratnam, N.: *Turbulence Characteristics in a Rock-Ramp-Type Fish Pass*, 2014
- [24] Mohammed, Y.A., Saleh, Y.K., Ali, A.-A.M.: Experimental investigation of local scour around multi-vents bridge piers, *Alexandria Engineering Journal*, 54 (2015) 2, pp. 197-203
- [25] de Ruijsscher, T., Hoitink, A.J.F., Dinnissen, s., Vermeulen, B., et al.: *Application of A Line Laser Scanner for Bed Form Tracking in A Laboratory Flume*, 2018
- [26] Sheppard, D.M., Melville, B., Demir, H.: Evaluation of Existing Equations for Local Scour at Bridge Piers, *140 (2014) 1*, pp. 14-23
- [27] Singh, A., Lanzoni, S., Wilcock, P.R., Fofoula-Georgiou, E.: Multiscale statistical characterization of migrating bed forms in gravel and sand bed rivers, *47 (2011) 12*
- [28] Sharma, A., Chavan, R., Kumar, B.: Multi-scale statistical characterization of migrating pier scour depth in non-uniform sand bed channel, *International Journal of River Basin Management*, 15 (2017) 3, pp. 265-276

## Pregled modela za mjerenje povjerenja u građevinskim projektima

Ivona Ivić<sup>1</sup>, prof.dr.sc. Anita Cerić<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, iivic@grad.hr

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, anita@grad.hr

### Sažetak

Loša komunikacija među sudionicima jedan je od glavnih rizika u projektima. Komunikacijske rizike moguće je smanjiti boljom suradnjom i izgradnjom povjerenja među sudionicima. Povjerenje se mijenja tijekom vremena, opada i raste ovisno o promjenama u projektu te ga je potrebno kvantificirati, odnosno mjeriti tijekom trajanja projekta. U ovom je radu dan pregled modela za mjerenje povjerenja u građevinskim projektima. Analizirane su prednosti i ograničenja opisanih modela te dane smjernice za daljnja istraživanja.

*Ključne riječi: povjerenje, mjerenje povjerenja, modeli povjerenja, građevinski projekti, informacijska asimetrija*

## A review of trust measurement models for construction projects

### Abstract

Poor communication between project participants is one of the biggest risks in projects. It is possible to minimize communication risks by enhancing cooperation and developing trust between stakeholders. Trust varies over time, increasing and decreasing depending on the changes in the project. Therefore, it is necessary to quantify or measure trust during the project lifecycle. A review of models for trust measurement on construction projects is presented in the paper. Their positive and negative aspects are analysed and guidelines for future research are proposed.

*Key words: trust, trust measurement, trust models, construction projects, information asymmetry*

## 1 Uvod

Komunikacijski rizici mogu se nazvati superrizikom koji se javlja u bilo kojem trenutku uporabljivosti građevinskih projekata i može utjecati na aktivaciju ostalih rizika [1]. Project Management Institut [2] navodi kako čak 56 % ukupnih troškova uzrokovanih rizicima u projektima otpada na komunikacijske rizike, a njihova je najveća posljedica upravo neuspjeh projekta. Dobro upravljanje komunikacijom stoga je važan dio upravljanja građevinskim projektima. Prema agencijskoj teoriji (engl. *Principal-Agent Theory*), među sudionicima projekta često dolazi do informacijske asimetrije [3]. Informacijska asimetrija je situacija u kojoj sudionici na istom projektu, iako imaju iste ciljeve, ponekad ne dijele informacije s ostalim stranama uključenim u projekt radi osobnih interesa. Prvo istraživanje na temu informacijske asimetrije proveo je nobelovac iz ekonomije Akerlof u poznatom znanstvenom radu "The Market for Lemons (1970)" [4]. Od tada je osim u ekonomiji, izučavanje i primjena informacijske asimetrije, odnosno agencijske teorije, prisutno i u ostalim znanstvenim disciplinama, pa tako i u građevinarstvu. U građevinskim projektima glavne uloge imaju investitor, izvođač te njihovi voditelji projekata. Osim njih, u svakom projektu sudjeluju i projektanti, podizvođači, itd. Investitori su prema agencijskoj teoriji "principali", a "agent" je izvođač radova koji za investitora treba izgraditi određenu građevinu.

Cerić [5] se u svome istraživanju o komunikacijskim rizicima u građevinskim projektima bavila rangiranjem strategija minimizacije komunikacijskih rizika uzrokovanih informacijskom asimetrijom. U tom su istraživanju voditelji projekta s velikim inozemnim iskustvom ocijenili upravo povjerenje kao najbolju strategiju za smanjenje komunikacijskih rizika u fazi izgradnje građevine, kada glavni odnos koji utječe na uspjeh projekta postaje onaj između dva voditelja projekta: predstavnika investitora i predstavnika izvođača.

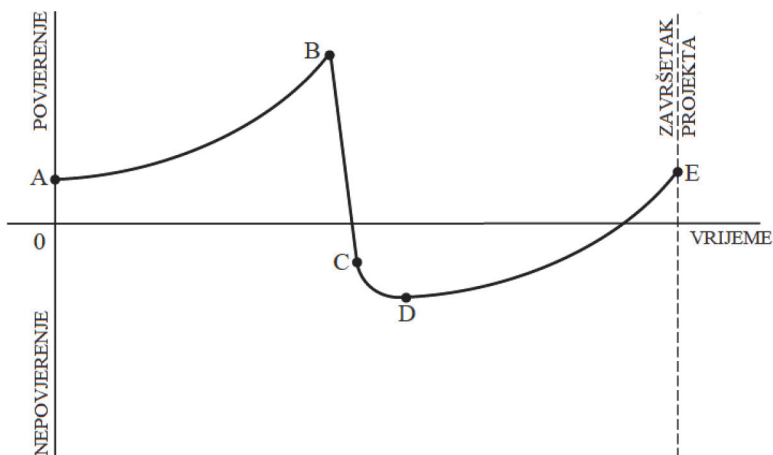
Povjerenje je zbog svog pozitivnog utjecaja na uspjeh projekta česta tema u novijim istraživanjima na polju upravljanja građevinskim projektima. Međutim, malo je istraživanja koja se bave kvantifikacijom tog dinamičkog i složenog aspekta ljudske prirode. Naime, povjerenje je zbog njegove nejasnosti, dinamičnosti i kompleksnosti vrlo teško kvantificirati [6]. Često povjerenje za jednog sudionika znači jedno, a za drugoga nešto drugo. Međutim, osnovna funkcija upravljanja projektima je kvantifikacija, sistematizacija i dokumentacija svih svojih aktivnosti, kako bi se one mogle pratiti i uspoređivati s planiranim stanjem. Kako je povjerenje dokazano jedan od glavnih faktora uspjeha projekta [7, 8, 9], nužno je uspostaviti mjerljive kriterije za njegovu procjenu u građevinskim projektima.

U ovome se radu uspostavljaju početni okviri za kvantifikaciju povjerenja u građevinskim projektima. U svrhu krajnjeg cilja određivanja razine povjerenja koja ima pozitivan utjecaj na njegov uspjeh, najprije treba odrediti model za mjerenje povje-

renja. Iz tog su razloga uspoređena dosadašnja istraživanja koja su se bavila mjerenjem povjerenja u građevinskim projektima. U raspravi su opisani modeli uspoređeni te su istaknute njihove prednosti i nedostaci. Na kraju su donesene smjernice za daljnja istraživanja koja bi mogla voditi do uspješnijeg upravljanja povjerenjem (engl. *trust management*) kroz životni vijek građevinskih projekata.

## 2 Dinamika povjerenja u građevinskim projektima

Povjerenje je ovisno o specifičnoj situaciji i kontekstu. Dakle, kad govorimo o povjerenju, govorimo o osobi A koja vjeruje osobi B u odnosu na neko ponašanje X u kontekstu Y i vremenu t [10]. Zato je za uspješno upravljanje povjerenjem u građevinskom projektu potrebno pratiti razinu povjerenja tijekom njegova trajanja. Na slici 1. prikazan je konceptualni dijagram promjene razine povjerenja među sudionicima u projektu, prema [5].



Slika 1. Dinamika povjerenja među sudionicima u projektu [5]

Slova A-E prikazuju kritične točke u tom procesu. Naime, na početku projekta povjerenje je među sudionicima na pozitivnoj razini jer ulaze u projekt s dozom optimizma (točka A). Kako vrijeme odmiče, povjerenje se povećava kako se sudionici upoznaju i dijele informacije među sobom (točka B). Međutim, ako u projektu dođe do konflikta, događa se raspad povjerenja i ono pada u negativnu sferu nepovjerenja (točka C). U tom trenutku sudionici moraju popraviti povjerenje komunikacijom i ostalim aspektima koji povećavaju povjerenje (točka D). Kada se povjerenje dovede u uobičajeno stanje, sudionici se počinju sve više truditi ponovno ga povećati te do kraja projekta ono može ponovno završiti u pozitivnom dijelu (točka E).

Proces na slici 1. prikazan je samo u konceptualnom obliku, međutim, svakako je korisno u budućnosti istražiti dinamiku povjerenja na stvarnim projektima te tako dobiti osnovu za praćenje njezine razine tijekom izvedbe građevinskih projekata. Prvi korak u tome je definiranje elemenata povjerenja koje je potrebno mjeriti. Takve elemente istraživali su znanstvenici u nekoliko dosadašnjih istraživanja o mjerenju povjerenja u građevinskim projektima. Primjerene metode i modeli istraženi su pregledom dosadašnjih ispitivanja u sljedećem poglavlju.

### **3 Dosadašnja istraživanja o mjerenju povjerenja**

Znanstvenici su tijekom godina razvili velik broj modela namijenjenih mjerenju povjerenja. Iako prednjače ona u psihologiji i sociologiji [10], danas postoje mnoga istraživanja o mjerenju povjerenja i u ostalim područjima poput ekonomije [11], informacijskih znanosti [12, 13, 14], prodaje [15], menadžmenta organizacije [16, 17, 18] i građevinarstva [19, 20, 21, 22]. Prije detaljnijeg opisivanja modela iz područja građevinarstva, potrebno je objasniti metode mjerenja povjerenja, koje su analizirane u nastavku.

#### **3.1 Metode mjerenja povjerenja**

U literaturi se spominju dvije osnovne empirijske metode prikupljanja podataka o povjerenju: upitnici i igre [10, 23]. Upitnici su primjer direktne metode koja je koncipirana na način da se ispitanici izjašnjavaju sami o svojem osjećaju povjerenja. Igre se pak ubrajaju u indirektno metode u kojima se vrši procjena o povjerenju pojedinaca tako da se promatraju njegove odluke, ponašanje i reakcije na unaprijed određene scenarije [10].

Najpoznatiji primjer indirektnih metoda je igra povjerenja (engl. *trust game*) koju su 1995. godine razvili Berg, Dickhaut i McCabe [11]. Igra povjerenja uključuje dva nepoznata sudionika koja se ne mogu vidjeti i ne znaju ništa jedan o drugome. Obojici se daje novac u iznosu primjerice od 10 dolara. Jedan ima ulogu pošiljatelja i može odlučiti koliko će od dobivenog novca poslati primatelju. Svrha toga je da se poslani novac utrostručuje u vlasništvu primatelja, a on tada dobiva priliku odlučiti o vraćanju određenog dobivenog iznosa pošiljatelju. Kako pošiljatelj ne poznaje primatelja, njegova odluka o iznosu koji šalje isključivi je dokaz razine njegovog povjerenja. Tako se u eksperimentu povjerenje mjeri iznosom poslanog novca. Mnogi znanstvenici su kasnije prilagođavali originalnu igru povjerenja, kritizirali je ili ponavljali. Međutim, ona je i dalje najčešće upotrebljavana za mjerenje interpersonalnog povjerenja [23].

U psihologiji se, međutim, najčešće upotrebljavaju direktne metode, odnosno upitnici. Takvi upitnici sastoje se od niza izjava koje se odnose na povjerenje i odražavaju

nečiju povjerljivost prema drugima. Njima se mogu ispitivati različite dimenzije i vrste povjerenja. Mogu sadržavati samo jednu ili više izjava povjerenja koje se mogu grupirati tako da više njih označava jednu dimenziju povjerenja [10]. Na primjer, tri drukčije definirane izjave mogu označavati istu dimenziju povjerenja i na taj način ispitivati točnost procjene ispitanika. Najpoznatiji primjeri upitnika o povjerenju su Rosenbergova skala povjerenja u ljude iz 1956. godine [24] i Rotterova skala interpersonalnog povjerenja iz 1967. godine [25]. Načini zapisivanja razine povjerenja u upitnicima mogu biti različiti. Najpoznatiji su primjeri Likertova skala (na primjer, ocjene od 1 do 7), binarno označavanje (0 označava nedostatak povjerenja, a 1 povjerenje) i postotci (od 1 do 100 % povjerenja) [10]. Osim toga, koristi se i Fuzzy logika koja omogućava numeričku analizu jezičnih izraza. Fuzzy logika se povezuje s povjerenjem upravo zbog spomenute kompleksnosti i nejasnosti prirode povjerenja. Naime, različiti ljudi različito poimaju skale kojima ocjenjuju svoje povjerenje pa Fuzzy logika pomaže u njihovom unificiranju. U istraživanjima se najčešće koristi u području informacijskih znanosti, na primjer za procjenu kvalitete usluge mobilnih mreža [12] ili povjerenja u nepoznate osobe na internetu [13].

Iako se opisane metode mjerenja povjerenja znatno razlikuju, dokazao je da u nekim aspektima mogu jednako ocijeniti nečije povjerenje [23]. Međutim, istraživanja su također pokazala kako je cjelokupna veza između rezultata upitnika i igara povjerenja zapravo slaba i neznatna [26]. Razlog tome može se naći i u mnogobrojnim debatama koje se vode oko mjerenja povjerenja. Neke od njih koje spominju Bauer i Freitag [10] su: (a) debata o relevantnosti samoprocjene – koliko je samoprocjena povjerenja u korelaciji sa stvarnim ponašanjem pojedinca; (b) debata o broju izjava u upitnicima – veći broj izjava omogućava provjeru procjene ispitanika, dok s druge strane prilikom ispunjavanja upitnika, postoji averzija ispitanika prema velikom broju izjava; (c) debata o dimenzijama povjerenja – koliko dimenzija povjerenja je moguće identificirati i mjeriti jednim modelom; (d) debata o duljini skale u upitniku – pitanje je jesu li bolje binarne skale ili one koje omogućavaju veći izbor za ispitanika, poput Likertove skale ili postotaka; (e) debata o različitom tumačenju izjava od strane ispitanika – različiti ispitanici mogu različito protumačiti pojedine izjave, tj. ako se u izjavi spominje *obitelj*, to nekome može značiti *otac i majka*, a nekome drugome *stric, ujak, i slično*. Upravo iz tih razloga, svaki razvijeni upitnik u obliku konkretnog modela povjerenja mora se provjeriti, odnosno validirati. Jedan način predstavljaju intervjui s ispitanicima u kojima se provjerava njihovo shvaćanje svakog pitanja, a drugi način je validacija modela statističkim metodama [10].

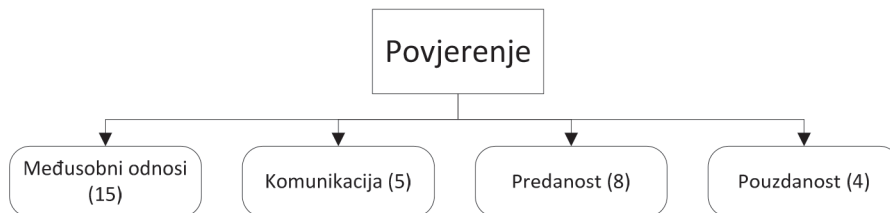
Kao što je već napomenuto, za različite slučajeve mjerenja povjerenja razvijen je velik broj modela. Pregledom literature, u građevinarstvu je moguće identificirati dva originalna modela i jedno istraživanje koje se bavilo mjerenjem povjerenja, ali koristeći dva prije razvijena modela u psihologiji. Njihove su karakteristike istaknute u nastavku.

### 3.2 Modeli za mjerenje povjerenja u građevinarstvu

Prvo istraživanje o mjerenju povjerenja u građevinskim projektima proveli su Lao i Rowlinson [22]. Oni su na primjeru 10 građevinskih projekata ispitivali ključne sudionike u gradnji u Hong Kongu: investitore, konzultante, izvođače i podizvođače. Cilj istraživanja bilo je mjerenje interpersonalnog i međuorganizacijskog povjerenja u građevinskim projektima u kojima su bile udružene dvije organizacije (engl. *partnering*) ili nije bilo takvog udruženja (engl. *non-partnering*). Ukupno su imali 40 odgovora. Model koji su koristili u upitniku za interpersonalno povjerenje bio je prilagođen prema Rotteru [25, 27], a sastojao se od 25 izjava povjerenja. Međuorganizacijsko povjerenje ispitivano je na temelju modela koji su implementirali Cummings i Bromiley [17]. Taj je model uključivao tri elementa povjerenja: obavezivanje, pošteno pregovaranje i izbjegavanje uzimanja prednosti pred drugom stranom, koji su bili organizirani također u 25 izjava povjerenja. Na svaku izjavu ispitanici su mogli odgovoriti prema Likertovoj skali od 1 do 7. Pri tome je 1 označavao najniži stupanj povjerenja, a 7 najviši. Prema tome, za svaki analizirani projekt dobiveni su rezultati razine povjerenja u rasponu od 25 do 175.

Prvi originalni model za mjerenje povjerenja ispitan na članovima građevinskog sektora napravili su Swan i suradnici [19], a konačan rezultat nazvali su registar povjerenja (engl. *Trust Inventory*). Taj registar povjerenja sadrži 32 izjave koje ispituju interpersonalno povjerenje u građevinskim projektima. Do njihovog oblikovanja došlo se kroz dvije faze. Prva je uključivala 32 polustrukturirana intervjua provedena među sudionicima građevinskih projekata na svim razinama – od direktora do polukvalificiranih radnika. Nadalje su korištene analiza sadržaja (engl. *content analysis*) i statističke metode za obradu sadržaja dobivenog intervjui. Druga faza istraživanja bila je razvijanje analize mreže društvenih odnosa (engl. *Social Network Analysis*) među sudionicima u građevinskom projektu. Ta je analiza primijenjena za identifikaciju ključnih odnosa među sudionicima bez kojih ostali komunikacijski kanali ne bi postojali.

Izjave povjerenja oblikovane su na temelju prošlog rada Cummingsa i Bromileya [17]. Ukupno 32 izjave koje su preostale nakon validacije modela podijeljene su u četiri glavne grupe elemenata povjerenja: međusobni odnosi (15 izjava), komunikacija (5 izjava), predanost (8 izjava) i pouzdanost (4 izjave) (slika 2.). Međusobni odnosi pružaju uvid u zajedničke vrijednosti koje dijele ispitanici i osobe kojima vjeruju te način na koji stvaraju odnose i veze s drugima. Izjave o komunikaciji pak odražavaju prirodu komunikacije ispitanika, to jest, njezinu iskrenost, pravovremenost, integritet i otvorenost, kao četiri najvažnija faktora za povjerenje. Predanost i pouzdanost također su vrlo bitni faktori za uspješan rad i održavanje odnosa u projektnim timovima.



Slika 2. Model za mjerenje povjerenja, prilagođeno prema [19]

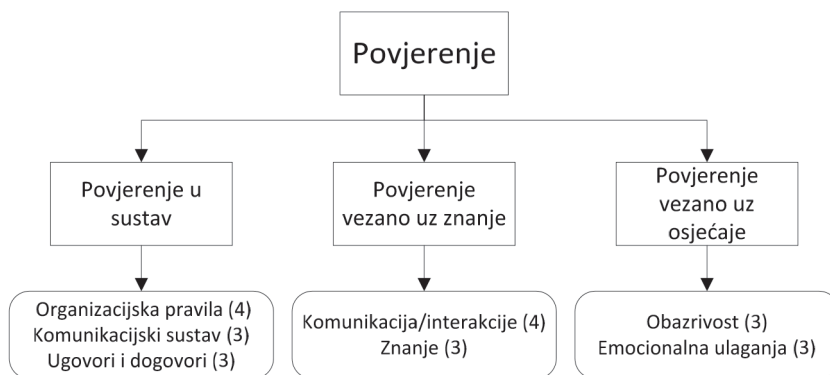
Ovaj je model provjeren na stvarnim projektima i primijenjen je na ukupno 150 odnosa među sudionicima. Visoka stopa odgovora označava da ne uzima previše vremena za rješavanje i da je shvaćen kao koristan za primjenu u praksi [19]. U ispitivanjima su se izjave u upitnicima ocjenjivale koristeći Likertovu skalu od 1 do 6, gdje 1 označava “slažem se”, a 6 “ne slažem se”. U tablici 1. prikazan je primjer bilježenja rezultata, gdje je ukupno povjerenje u odnosu ocijenjeno kao lagano negativno (3,9/6). U njemu je, na temelju pojedinih ocjena izjava iz upitnika, istraživački tim izračunao vrijednosti povjerenja za pojedinu grupu elemenata kako bi se saznalo za koju je od njih povjerenje jače, a za koju slabije.

Tablica 1. Primjer tablice za mjerenje povjerenja, prilagođeno prema [19]

| Osoba   | Odnos s... | Izračun ocjena povjerenja za pojedini faktor |                 |           |            |        |
|---------|------------|--|-----------------|-----------|------------|--------|
|         |            | Komunikacija                                 | Međusobni odnos | Predanost | Pouzdanost | Ukupno |
| Osoba A | Osoba B    | 3  | 4,4             | 3,4       | 4,5        | 3,9    |

Wong [20] je u svom magistarskom radu razvila drugačiji registar povjerenja koji je prije svega namijenjen za ocjenjivanje povjerenja između tvrtki u procesu ugovaranja u građevinskim projektima. Taj registar ima 23 izjave povjerenja koje su grupirane u tri skupine elemenata povjerenja: povjerenje u sustav (engl. *system-based trust*), čiji su aspekti organizacijska politika, sustav komunikacija i ugovori; povjerenje vezano uz znanje (engl. *cognition-based trust*), čiji su aspekti komunikacija/interakcija i znanje; i povjerenje vezano uz osjećaje (engl. *affect-based trust*), čiji su aspekti obazrivost i emocionalna ulaganja. Ovi elementi povjerenja zapravo označuju različite dimenzije, odnosno izvore povjerenja za nekog pojedinca. Slika 3. prikazuje oblik modela s brojem izjava zapisanim u zagradi iza svakog pojedinog aspekta povjerenja.





Slika 3. Model za mjerenje povjerenja, prilagođeno prema [20]

Povjerenje u sustav nastaje zbog formaliziranih i proceduralnih dogovora, to jest ugovora među sudionicima. Povjerenje vezano uz znanje razvija se na temelju objektivnih spoznaja o partneru i njegovoj povjerljivosti. Na kraju, povjerenje vezano uz osjećaje dolazi iz ljudske potrebe da se vežu uz druge i ulažu u međusobne odnose. Identificirani elementi povjerenja su tada organizirani u niz izjava povjerenja. Neke od njih su: “Trebali bismo dokumentirati formalnu komunikaciju s partnerima na sistematičan način.” (primjer za povjerenje u sustav komunikacija); i “Mislimo da je financijska stabilnost jedan od faktora ocjenjivanja partnerove pouzdanosti.” (primjer za povjerenje vezano uz znanje).

U svrhu validacije modela upitnik u dvaput u razmaku od tri mjeseca rješavala 163 građevinska profesionalca iz Hong Konga, to jest, voditelji projekata, arhitekti, inženjeri, pravni savjetnici, kalkulanti i koordinatori projekta. Za određivanje povjerenja korištena je Likertova skala od 1 (ne slažem se) do 7 (slažem se). Rezultati su detaljno statistički analizirani i model je dokazan kao pouzdan [21].

### 3 Rasprava

Radi usporedbe identificiranih modela mjerenja povjerenja u građevinarstvu te analize njihovih prednosti i ograničenja, u ovom su poglavlju istaknute njihove karakteristike u pogledu metodologije, ali i oblikovanja modela, to jest obuhvaćene su dimenzije povjerenja, broj izjava, oblik skale i jasnoća sadržaja izjava. Ovi elementi usporedbe oblikovani su na temelju prethodno istaknutih debata o mjerenju povjerenja [10].

Prva pretpostavka koju model za mjerenje povjerenja mora zadovoljiti jest to da mora biti vjerodostojan ispitanicima [17]. Također, povjerenje je ovisno o situaciji i trenutku u kojem se mjeri [10]. Iz tih je razloga bitno razviti model posebno prilagođen uvjetima u kojima će se povjerenje ispitivati. U kontekstu građevinskog projekta

potrebno ga je oblikovati i provjeriti među građevinskim stručnjacima, sudionicima u određenom procesu koji se ispituje. Iz tog razloga modeli koji su prvotno razvijeni za općenite slučajeve, a korišteni su u istraživanju [22], nisu prikladni za mjerenje povjerenja u građevinskim projektima. To je ujedno i najveći nedostatak prvog istraživanja koje se bavilo mjerenjem povjerenja u građevinarstvu. Drugo njegovo ograničenje je broj i struktura ispitanika. Naime, u istraživanju je sudjelovalo 40 ispitanika, a ono je rađeno za specifične uvjete Hong Konga. Svakako je za poopćavanje modela povjerenja potrebno uključiti ispitanike iz različitih zemalja i različitih profila. Struktura ispitanika ujedno je ograničenje i dva originalna modela mjerenja povjerenja u građevinarstvu [19, 20]. Naime, istraživanje [19] potpomognuto je od strane Vlade Ujedinjenog Kraljevstva te, iako se podrijetlo ispitanika ne spominje, može se zaključiti da su u oblikovanju registra povjerenja sudjelovali stručnjaci iz te zemlje. Istraživanje [20] provjeravalo je oblikovani model također na ispitanicima iz građevinskog sektora, s područja Hong Konga. Samo oblikovanje izjava povjerenja također je metodološki nedostatak istraživanja [20]. Naime, izjave su uobličene na temelju pregleda postojeće literature, ali nedostaje konkretnih objašnjenja zašto su neke uključene, a neke izostale. Najkvalitetniji način oblikovanja izjava identificiran je u istraživanju [19] u kojem su one oblikovane na temelju analize sadržaja provedenih polustrukturiranih intervjuja s građevinskim stručnjacima.

Prema dimenzijama povjerenja koje uključuju, modeli se ne razlikuju znatno. Naime, iako su zapisani na drugačiji način, sva tri istraživanja proučavala su prošla istraživanja koja su utjecala na njih (posebno [17]), što je vidljivo iz oblikovanja izjava. Međutim, istraživanje [20] najdetaljnije teorijski opisuje tri dimenzije povjerenja koje se mogu javiti u građevinskim projektima.

Prema pregledanoj literaturi, broj izjava u relevantnim upitnicima mjerenja povjerenja kreće se između 12 [17] i 32 [19]. U istraživanju [19] komentiran je broj izjava te je zaključeno kako 32 izjave i dalje nisu prevelik broj za dostizanje averzije ispitanika prema upitniku. S druge strane, pretpostavlja se kako mali broj izjava ne bi bio dovoljan da se obuhvate različite dimenzije povjerenja [10] te istraživanja koja koriste jedno ili nekoliko pitanja za mjerenje povjerenja stoga nisu prikladna. U predstavljanim se istraživanjima različite grupe elemenata sastoje od različitog broja izjava (15-5-8-4 i 10-7-6). Veći broj izjava koje opisuju pojedinu grupu označuje točniji rezultat jer se tako detaljnije analizira vjerodostojnost odgovora ispitanika [10]. Naime, pretpostavka je da za jednu grupu elemenata ispitanik ima istu (ili vrlo sličnu) procjenu razine povjerenja, što se s većim brojem izjava lakše provjerava. Preporuka je svakako koristiti sličan broj izjava za svaku grupu elemenata [17], ali dovoljan za osiguranje vjerodostojnosti rezultata. Prema tome je istraživanje [20] bolje oblikovalo izjave od istraživanja [19]. Razlog tome je što su se grupe elemenata u istraživanju [19] formirale naknadno faktorskom analizom, a u istraživanju [20] su izjave oblikovane na temelju prethodno definiranih grupa.

Skala korištena u svim istraživanjima je Likertova skala. Broj mogućih ocjena u istraživanju [19] je 6, a u ostala dva 7. Naime, Likertova skala prema svojoj je duljini u sredini između binarne i postotne skale te je poznata i prikladna u ovakvim upitnicima. Binarna skala manje je pouzdana te nije moguće detaljnije analizirati odgovore ispitanika, a postotna skala se rjeđe koristi jer zahtijeva poznavanje postotaka od strane ispitanika, što nije moguće uvijek očekivati [10]. Dulje skale primjenije su za obradu rezultata, ali istraživanja su pokazala kako ljudski mozak najbolje percipira 6-7 različitih kategorija ili objekata [28] te je zbog toga najbolje koristiti Likertovu skalu od 6 ili 7 razina odgovora. Pri tome neparan broj razina omogućava ispitanicima izbor srednje opcije, što može biti bolje u nekim slučajevima.

Što se tiče jasnoće sadržaja izjava, sva tri istraživanja moguće je unaprijediti u tom smislu. Naime, u izjavama često nedostaje opis konkretne situacije. Takav primjer moguće je vidjeti u izjavi iz [20]: "Vjerojatnije je da ću se osloniti na poslovnog partnera za kojeg imam dobar dojam (engl. *impression*).“ Dodavanje konkretne situacije u kojem se treba osloniti na partnera u ovom bi slučaju omogućilo točniju procjenu ispitanika.

## 4 Zaključak

U ovom je radu napravljen pregled dosadašnjih istraživanja na temu kvantifikacije, tj. mjerenja povjerenja u građevinskim projektima. Izgradnja povjerenja je strategija za minimizaciju komunikacijskih rizika u fazi izvođenja građevinskih projekata te vrlo važan aspekt uspjeha projekta. Međutim, u praksi upravljanja projektima povjerenje se još uvijek ne planira niti ne kontrolira. To je dijelom posljedica nepostojanja unificiranog modela kojim bi se ono mjerilo. Prema znanstvenim istraživanjima, mjerenje povjerenja moguće je putem upitnika ili igara povjerenja. U građevinarstvu su pak identificirana tri istraživanja koja su se bavila mjerenjem povjerenja. Dva od tih istraživanja su razvila svoje originalne modele, dok je jedno koristilo prethodno razvijene modele za mjerenje interpersonalnog i međuorganizacijskog povjerenja. Prednosti i nedostaci tih modela analizirani su u raspravi. Otkriveno je kako svaki od njih ima određene nedostatke od kojih su najveći struktura ispitanika i nedostatak jasnoće sadržaja izjava povjerenja.

U budućim istraživanjima potrebno je ispitati mogućnost oblikovanja modela mjerenja povjerenja prikladnog za općeniti slučaj građevinskog projekta koji bi bilo moguće koristiti u svakom trenutku njegovog trajanja. Cilj identifikacije takvog modela je buduće određivanje dijagrama povjerenja u građevinskim projektima koji je za sada prikazan samo u konceptualnom obliku. Taj dijagram moguća je polazna točka za kontrolu i upravljanje povjerenjem u građevinskim projektima.

## Literatura

- [1] Dey, P.P., Khan, M., Amin, M., Sinha, B.R., Badkoobehi, H., Jawad, S., Any, L.A.: Managing interacting software project risks, *PressAcademia Procedia, Global Business Research Congress (GBRC)*, Istanbul, 2016.
- [2] Project Management Institution: PMI's Pulse of the Profession In-Depth Report: The High Cost of Low Performance: The Essential Role of Communications, 2013, [www.pmi.org/-/media/pmi/documents/public/pdf/learning/thought-leadership/pulse/pulse-of-the-profession-2013.pdf](http://www.pmi.org/-/media/pmi/documents/public/pdf/learning/thought-leadership/pulse/pulse-of-the-profession-2013.pdf), 30.5.2019.
- [3] Jäger, C.: *The Principal-Agent Theory within the Context of Economic Sciences*, Herstellung und Verlag, Books on Demand GmbH, 2008.
- [4] Akerlof, G.A.: The market for "lemons": quality uncertainty and the market mechanism, *The Quarterly Journal of Economics* 8 (1970) 3, pp. 488-500.
- [5] Cerić, A.: *Trust in Construction Projects*. Oxon: Routledge, 2016.
- [6] Chang, E., Thomson, P., Dillon, T.S., Hussain, F.K.: The fuzzy and dynamic nature of trust, *Trust, Privacy, and Security in Digital Business, TrustBus 2005: Lecture Notes in Computer Science, vol. 3592*, (ur. Katsikas, S., López, J., Pernul, G.), Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 161-174, 2005.
- [7] Jiang, W., Lu, Y., Le, Y.: Trust and project success: a twofold perspective between owners and contractors, *Journal of Management in Engineering* 32 (2016) 6, pp. 04016022-1 - 04016022-16.
- [8] Yeung, J.F.Y., Chan, A.P.C., Chan, D.W.M.: Developing a performance index for relationship-based construction projects in Australia: delphi study, *Journal of Management in Engineering* 25 (2009) 2, pp. 59-68.
- [9] Cheng, E.W.L., Li, H., Love, P.E.D.: Establishment of critical success factors for construction partnering, *Journal Of Management In Engineering* 16 (2000) 2, pp. 84-92.
- [10] Bauer, P.C., Freitag, M.: Measuring Trust, *The Oxford Handbook of Social and Political Trust, Chapter 2*, (ur. Uslaner, E.M.), Oxford Handbooks Online, Oxford University Press, pp. 15-36, 2017.
- [11] Berg, J., Dickhaut, J. McCabe, K.: Trust, reciprocity, and social history. *Games and Economic Behavior* 10 (1995), pp. 122-142.
- [12] Tyagi, S., Som, S., Rana, Q.P.: Trust based fuzzified multicast group preventing flooding to ensure QoS in Mobile Adhoc Networks, *Fifth International Symposium on Innovation in Information and Communication Technology (ISIICT)*, Amman: IEEE, 2018.
- [13] Seo, Y., Han, S.: Local scalar trust metrics with a fuzzy adjustment method, *KSII Transactions On Internet And Information Systems* 4 (2010) 2, pp. 138-153.

- [14] Hiltunen, J., Kuusijärvi, J.: Trust metrics based on a Trusted Network Element, *IEEE International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications (TrustCom)*, Helsinki: IEEE, pp. 660-667, 2015.
- [15] da Costa Hernandez, J.M., dos Santos, C.C.: Development-based trust: proposing and validating a new trust measurement model for buyer-seller relationships, *Brazilian Administration Review* 7 (2010) 2, pp. 172-197.
- [16] McEvily, B., Tortoriello, M.: Measuring trust in organisational research: review and recommendations, *Journal of Trust Research* 1 (2011) 1, pp. 23-63.
- [17] Cummings, L.L., Bromiley, P.: The organizational trust inventory (OTI): development and validation, *Trust in Organizations: Frontiers of Theory and Research*, (ur. Kramer, R.M., Tyler, T.R.), Sage Publications, Inc., Thousand Oaks, pp. 302-330, 1996.
- [18] Currall, S.C., Judge, T.A.: Measuring trust between organizational boundary role persons, *Organizational Behavior and Human Decision Processes* 64 (1995) 2, pp. 151-170.
- [19] Swan, W., McDermott, P., Khalfan, M.M.A., Cooper, R., Rees, C., Wood, G.: The development of trust inventory, *Journal of Construction Procurement* 11 (2005) 1, pp. 40-54.
- [20] Wong, W.K.: *A Trust Inventory for Use in the Construction Industry*, Master thesis. Hong Kong: City University of Hong Kong, 2007.
- [21] Cheung, S.O., Wong, W.K., Yiu, T.W., Pang, H.Y.: Developing a trust inventory for construction contracting, *International Journal of Project Management* 29 (2011), pp. 184–196.
- [22] Lau, E., Rowlinson, S.: Interpersonal trust and inter-firm trust in construction projects, *Construction Management and Economics* 27 (2009), pp. 539-554.
- [23] Ben-Ner, A., Halldorsson, F.: Measuring trust: which measure can be trusted?, *Working Papers from Human Resources and Labor Studies, University of Minnesota (Twin Cities Campus)*, <https://EconPapers.repec.org/RePEc:hrr:papers:0207>, 5.7.2019.
- [24] Rosenberg, M.: Misanthropy and political ideology, *American Sociological Review* 21 (1956) 6 pp. 690–695.
- [25] Rotter, J.B.: A new scale for the measurement of interpersonal trust, *Journal of Personality* 35 (1967) 4, pp. 651–665.
- [26] Glaeser, E.L., Laibson, D.I., Scheinkman, J.A., Soutter, C.L.: Measuring trust, *Quarterly Journal of Economics* 115 (2000) 3, pp. 811–846.
- [27] Rotter, J.B.: Generalized expectancies of interpersonal trust, *American Psychologist* 26 (1971), pp. 443–452.
- [28] Miller, G.A.: The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information, *Psychological Review* 63 (1956), pp. 81-97.

## Mogućnosti primjene pepela drvene biomase u proizvodnji opeke

Jelena Šantek Bajto<sup>1</sup>, prof.dr.sc. Nina Štirmer<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za materijale, jbjajto@grad.hr

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za materijale, ninab@grad.hr

### Sažetak

Jedno od mogućih rješenja o postupanju s otpadnim pepelom nastalim izgaranjem drvene biomase (PDB) jest njegovo korištenje u proizvodnji opeke. Ovisno o fizikalnim i kemijskim svojstvima PDB-a, koja su bliska svojstvima sirovina u proizvodnji opeke, PDB može djelomično zamijeniti prirodne, sastavne sirovine opeke. Potrebno je utvrditi utjecaj kemijskog sastava i mikrostrukture PDB-a na svojstva gotovih proizvoda, s ciljem proizvodnje opeke s optimalnim udjelom PDB-a za postizanje fizikalnih i mehaničkih svojstava te svojstava trajnosti približno jednakih svojstvima konvencionalne opeke.

*Ključne riječi: biomasa, drveni pepeo, proizvodnja opeke, otpad, kemijski sastav*

## Possibilities of wood biomass ash use in brick production

### Abstract

One of feasible solutions for wood biomass ash (WBA) sustainable management is to use it in brick production. Considering physical and chemical properties of WBA, which are similar to the properties of brick-making materials, WBA could partially replace natural resources. It is necessary to determine the impact of the WBA chemical composition and microstructure on the properties of formed products, with the aim of producing bricks with an optimal share of WBA, as this would enable achieving physical, mechanical, and durability properties that are approximately equal to the properties of conventional bricks.

*Key words: biomass, wood ash, brick production, waste, chemical composition*

## 1 Uvod

Aktivnosti svih zemalja članica Europske unije (EU), među kojima je i Hrvatska, usmjerene su na ispunjenje smjelih energetske i klimatske ciljeve koji, između ostalog, obuhvaćaju korištenje minimalna 32 % energije iz obnovljivih izvora do 2030. te smanjenje emisija stakleničkih plinova u iznosu od 40 % do 2030. u odnosu na razinu iz 1990. godine [1]. Najznačajniji izvor obnovljive energije u EU čini čvrsta i plinovita biomasa, poglavito drvo i drveni otpad [2], što podupire europski plan za postupno zatvaranje svih energana na ugljen do 2030. godine. Smanjenje korištenja ugljena u zemljama Europske unije i postupno napuštanje fosilnih goriva rezultiralo je povećanim korištenjem biomase kao održivog goriva. Procjenjuje se da bi se korištenjem energije iz obnovljivih izvora u iznosu od 20 %, ispunjenjem cilja utvrđenog Direktivom 2009/28/CE, ostvarila proizvodnja od približno 15,5 milijuna tona pepela biomase godišnje u EU-u do 2020. godine [3]. Dakle, ugljična neutralnost u svakom je slučaju sastavni dio dugoročne energetske i klimatske strategije EU, čijim se ostvarenjem do 2050. godine želi osigurati prelazak na „zeleno“ gospodarstvo [4]. Iskorištavanje bioenergije može značajno doprinijeti postizanju ambicioznih europskih ciljeva, pod uvjetom da se biomasa proizvodi i koristi na održiv način [5,6]. Drvena biomasa smatra se ugljično neutralnim gorivom zbog toga što drvo apsorbira istu količinu ugljičnog dioksida tijekom rasta kao i tijekom izgaranja, što ju čini poželjnijim energentom u odnosu na druge vrste biomase. Tome u prilog govori i položaj drvene biomase na vrhu ljestvice obnovljivih izvora energije korištenih u EU s većinskim udjelom od 59 % svih obnovljivih izvora energije [6, 7]. Kao posljedica povećanja broja energana na biomasu generiraju se velike količine pepela koji nastaje kao nusproizvod prilikom njenog izgaranja. Iako već postoje brojne mogućnosti njegove uporabe, sadašnja praksa gospodarenja PDB-om u Europi i Hrvatskoj zasniva se većinom na odlaganju PDB-a na odlagališta. Pritom vrlo lako može doći do onečišćenja zraka zbog prijenosa sitnih čestica PDB-a nošenih vjetrom, što može uzrokovati respiratorne zdravstvene probleme stanovnicima koji žive u blizini odlagališta. Zagađenje podzemnih voda zbog izlučivanja teških metala iz PDB-a i nedostatak prostora za odlaganje otpada također predstavljaju značajan problem [8]. EU donošenjem novog „Paketa o otpadu“, koji između ostalog donosi izmjene Direktive o otpadu i Direktive o odlagalištima otpada [9,10], podupire smanjenje samog stvaranja otpada povećanim udjelom prerade i ponovne upotrebe te posljedično i smanjenje odlaganja otpada na odlagalištima.

Porastom razine ekološke svijesti u građevinskoj industriji, jača i potreba da se realizira ugradnja novonastalih otpada u tradicionalne građevne materijale, između ostalog i opeku. Zahvaljujući svojim izvanrednim mehaničkim i trajnosnim svojstvima te relativno niskoj cijeni, opeka već tisućama godina ima značajnu ulogu u graditeljstvu te je svoju popularnost zadržala sve do danas. Najstariji primjerci opeke

stari su oko 6000 godina, a datiraju još iz vremena antičkog grada Babilona kada se opeka izrađivala ručno i sušila na suncu [11]. Od tada do danas proces proizvodnje i sama opeka značajno su se promijenili, sve s ciljem stvaranja izdržljivih proizvoda visokih energetske performansi kroz ekonomski i ekološki učinkovit proces. Ipak, ta nastojanja ne mogu osporiti činjenicu da proizvodnja opeke zahtijeva znatnu količinu energije i resursa. Prema [12], potrošnja energije po toni proizvedene opeke procjenjuje se na 706 kWh, a emisija CO<sub>2</sub> iznosi 150 kg/t. Prema [13], procijenjeno je da prosječna omanja tvornica opekarskih proizvoda koristi 500 tona sirovina dnevno. Procjenjuje se da će količina CO<sub>2</sub> koja nastaje korištenjem goriva i potrošnjom električne energije potrebnih za proizvodnju opeke 2020. godine iznositi 22,5 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>, a emisija nastala uslijed proizvodnog procesa 10,89 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> [14]. Iako je prioritet samih proizvođača minimiziranje energenata odnosno troškova proizvodnje, potrebno je sagledati „širu sliku“ i uočiti važnost odgovornog iskorištavanja prirodnih resursa. Također treba uzeti u obzir i ugljični otisak opekarske industrije koji svakako nije zanemariv.

## 2 Sirovine za izradu opeke

Glinena opeka proizvodi se od gline, kvarcnog pijeska i manjih količina organskih tvari poput piljevine koje izgaraju prilikom procesa pečenja, dajući tako opeci željenu poroznost. Očekuje se da će se tijekom sinteriranja, odnosno pečenja opeke, pepeo s visokim udjelom ugljika ponašati kao organska tvar, ostavljajući male šupljine u matrici opeke [8, 11]. Kvaliteta opekarske gline nešto je manja od primjerice porculanske i lončarske, pri čemu opekarska glina sadrži mali, ali još uvijek dostatan udio glinenog minerala kaolinita, zaslužnog za stabilnost pri sušenju, plastičnost i obradljivost gline te koji omogućuje široki interval sinteriranja u kojem ne dolazi do narušavanja oblika proizvoda [11]. Primarni materijal koji se koristi pri izradi opeke svakako je glina, čija eksploatacijska polja nakon završetka ekstrakcije gline treba sanirati i vratiti barem u početno stanje. Iako u svijetu i u Hrvatskoj postoje značajne eksploatacijske rezerve opekarske gline, djelomičnom ili potpunom zamjenom prirodnih sirovina (gline i/ili pijeska i/ili piljevine) u proizvodnji opeke s otpadnim PDB-om riješio bi se problem upravljanja tim otpadom, a istovremeno bi se umanjilo korištenje sirovina iz prirode te posljedično i ublažio veliki ugljični otisak opekarske industrije. Također, prednost korištenja PDB-a kao sirovine u opeci je to što se energija potrebna za pečenje opeke može smanjiti, ovisno o količini organskih tvari sadržanoj u PDB-u [15, 16]. Organske tvari su u glinama prisutne u obliku ugljena, treseta i biljnih ostataka koji tijekom pečenja gline izgaraju, čineći je tako poroznijom. Na taj način organske tvari istovremeno doprinose smanjenju energije potrebne za pečenje, ali mogu i narušiti kvalitetu proizvoda uzrokujući oštećenja površine [11]. Zasad se samo 9 % alternativnih odnosno recikliranih materijala primjenjuje u



proizvodnji glinene opeke [17]. Uspoređujući kemijski sastav opekarske gline i pepela drvene biomase (tablica 1.), vidljivo je da su glavni kemijski sastojci PDB-a  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  i  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , tvoreći sustav  $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO}$  gdje su glavni mineraloški sastojci kvarc, kalcit i silikati, slični keramičkoj sirovini. Kemijski sastav PDB-a znatno ovisi o podrijetlu biomase te je vrlo promjenjiv, razlikujući se od pepela do pepela [18]. Carević i dr. u [19] prikazuju detaljnu karakterizaciju različitih, lokalno dostupnih pepela iz Hrvatske, u skladu s postojećim propisima za uporabu letećeg pepela u betonu (HRN EN 450-1). Na osnovi analize 21 uzorka različitih vrsta PDB-a prikupljenih s 10 različitih lokacija predlažu novu metodologiju preliminarnе provjere PDB-a koja u obzir uzima fizikalna i kemijska svojstva pepela te omogućuje kvalitativno rangiranje ispitanih PDB-a. Predložena preliminarna metodologija na taj način rješava značajan problem koji proizlazi iz visoke varijabilnosti kemijskog sastava PDB-a, čime bi se znatno olakšao odabir najprikladnijeg PDB-a ali i odgovarajućih daljnjih laboratorijskih ispitivanja. Takvo rangiranje PDB-a nužno je i za određivanje optimalnog udjela PDB-a u opekarskim proizvodima, odnosno predviđanje negativnog utjecaja na svojstva gotovog proizvoda.

**Tablica 1. Usporedba kemijskog sastava različitih opekarskih glina i PDB-a**

| Sastojak [% mas.]             | Opekarska glina 1 [11] | Opekarska glina 2* | Opekarska glina 3* | PDB 1 | PDB 2 | PDB 3 |
|-------------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|-------|-------|-------|
| $\text{SiO}_2$                | 56,04                  | 63,45              | 53,75              | 18,19 | 16,77 | 49,34 |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$       | 18,11                  | 16,23              | 17,64              | 3,14  | 2,53  | 12,42 |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$       | 6,39                   | 8,46               | 7,36               | 2,10  | 1,71  | 4,78  |
| $\text{CaO}$                  | 3,64                   | 0,50               | 2,75               | 57,93 | 43,68 | 18,58 |
| $\text{MgO}$                  | 3,02                   | 1,22               | 2,20               | 6,17  | 3,92  | 3,68  |
| $\text{Na}_2\text{O}$         | 1,20                   | 0,21               | 0,75               | 0,57  | 1,12  | 2,12  |
| $\text{K}_2\text{O}$          | 2,61                   | 1,24               | 2,69               | 8,10  | 21,51 | 5,28  |
| $\text{TiO}_2$                | -                      | 1,22               | 0,84               | 0,13  | 0,10  | 1,21  |
| Gubitak žarenjem LOI (950 °C) | 8,35                   | 6,78               | 11,5               | 3,0   | 17,7  | 6,0   |

\* Podaci o kemijskom sastavu opekarskih glina prikupljeni su od lokalnih proizvođača opeke

### 3 Mogućnosti primjene pepela u proizvodnji pečenih opekarskih proizvoda

Provedena su brojna istraživanja o mogućnostima djelomične pa čak i potpune zamjene konvencionalnih sirovina u proizvodnji opeke, mijenjajući ih s različitim vrstama pepela kao što su pepeo rižine ljuske, pepeo nastao spaljivanjem komunalnog otpada i komunalnog mulja, leteći pepeo od ugljena te pepeo od šećerne trske [12,

18]. U daljnjem dijelu ovog rada prikazana su novija istraživanja u kojima je pepeo nastao spaljivanjem biomase, posebice drveta, korišten kao zamjena za dio gline. Kroz prikazana istraživanja iskazan je znatni potencijal otpadnog pepela kao zamjenskog materijala u proizvodnji pečenih opekarskih proizvoda.

Iz pregleda stanja područja vidljivo je da se prednost daje indirektnim metodama ispitivanja svojstava trajnosti opeke s PDB-om, kao što su ispitivanja početnog (kapilarnog) upijanja i ukupnog upijanja vode te porne strukture. U navedenim istraživanjima nije primijenjena direktna metoda ispitivanja otpornosti opeke na cikluse smrzavanje/odmrzavanja, ali je ispitivana tlačna čvrstoća opeke koja je u indirektnoj vezi s otpornošću na cikluse smrzavanja/odmrzavanja.

Istražujući primjenu pepela u proizvodnji opeke, Eliche-Quesada i dr. [8] koristili su različite vrste pepela s dna peći kao zamjenu za 20 % gline. Korištene su sljedeće vrste pepela: P1 - pepeo nastao spaljivanjem drvne biomase (drvnih ostataka drvnoprerađivačke industrije poput kore drveta, drvne prašine te drvnih proizvoda nezadovoljavajuće kvalitete); P2 - pepeo nastao spaljivanjem ostataka od obrezivanja maslina i borova; P3 - pepeo nastao spaljivanjem komina maslina i P4 - pepeo od mljevenih koštica maslina. Na uzorcima pečenim pri temperaturi od 1000 °C nije došlo do pojave pukotina niti bubrenja. Svojstva poput skupljanja, upijanja vode, volumenske gustoće, poroznosti, tlačne čvrstoće te toplinska provodljivost analizirana su s obzirom na podrijetlo ugrađenog pepela te uspoređena s referentnim uzorcima od čiste gline. Najveće vrijednosti skupljanja, veće i od referentnih, zabilježene su na uzorcima s pepelima P3 i P4, dok su vrijednosti skupljanja uzoraka s pepelima P1 i P2 slične referentnim zbog veće količine kvarca, a posljedično i povećanja tekuće faze tijekom sinteriranja. Veće količine gubitka žarenjem (LOI) povezane su sa značajnim smanjenjem volumena odnosno pojavom velikih deformacija i lomova tijekom faze pečenja. Povećane vrijednosti kapilarnog upijanja vode kod uzoraka s pepelom mogu uzrokovati dehidraciju morta i loše prijanjanje morta prilikom ugradnje opeke. Najveće vrijednosti zabilježene su kod pepela P1 i P2, što je posljedica povećanja količine površinskih pora. Iako su vrijednosti kapilarnog upijanja kod svih uzoraka zadovoljavajuće, preporuča se močenje takvih opeka prije same ugradnje. Upijanje vode je, kao i kapilarno upijanje, povećano kod uzoraka s pepelom, posebice s pepelima P1 i P2. Udio otvorenih pora značajno se s povećao, dok je mali porast zatvorenih pora uočen samo kod uzoraka s P1. Ispitujući tlačnu čvrstoću, kod uzoraka s pepelom zabilježen je pad vrijednosti u rasponu od 2,5 do 31 %, pri čemu su najveće vrijednosti postignute kod opeke s 20 % pepela P1. Usporedno s povećanjem poroznosti, volumenska gustoća se kod uzoraka s pepelima P2 i P4 smanjuje zbog velikog udjela organske tvari i karbonata, čija razgradnja uzrokuje ekspanziju u opeci. Toplinska provodljivost uzoraka s pepelima znatno je smanjena, posebice kod uzoraka s pepelom P4 kod kojih to smanjenje iznosi 38 % odnosno toplinska provodljivost iznosi 0,65 W/mK. Prema tome, vidljiva je ovisnost toplinske

provodljivosti o gustoći, ali i o drugim faktorima kao što u mikrostruktura, udio, veličina i raspored pora. Prilikom procjene otpuštanja opasnih tvari (izluživanja teških metala) iz opeke s pepelom zabilježene su povećane koncentracije, ali ipak znatno manje od dopuštenih. Prema tome, potvrđena je kategorizacija pepela kao inertnog i neopasnog otpada te visoka razina imobilizacije teških metala ugradnjom pepela u opeku. Eliche-Quesada i dr. u [13] također prikazuju mogućnost korištenja letećeg PDB-a kao zamjenskog materijala u proizvodnji ekološki prihvatljive pečene opeke, ali i u udjelima većim od 20 %. Leteći pepeo i pepeo s dna peći, nastao od drvnih ostataka tijekom obrezivanja maslina i borova, korišten je kao dodatna sirovina za zamjenu gline u udjelima do maksimalno 30 %. Promatran je utjecaj PDB-a na skupljanje, upijanje vode i kapilarno upijanje, volumensku gustoću, tlačnu čvrstoću, toplinsku provodljivost i izluživanje teških metala. U obzir je uzet i utjecaj temperature pečenja. Rezultati su pokazali da je optimalna temperatura sinteriranja 1000 °C. Povećanjem temperature pečenja od 900 do 1000 °C, povećala se tlačna čvrstoća i smanjilo upijanje vode. Ipak, zamjenom gline s 30 % PDB-a proizvedena je opeka s vrlo velikim vrijednostima apsorpcije vode i slabijim mehaničkim svojstvima. Na osnovi dobivenih rezultata, optimalna količina PDB-a iznosi 20 %, kako bi se proizvela opeka zadovoljavajućih mehaničkih svojstava i smanjene toplinske provodljivosti. Opeka s dodatkom pepela s dna peći pokazala je bolja svojstva od opeke s letećim PDB-om. S obzirom na izluživanje teških metala, utvrđeno je da opeka s PDB-om ne predstavlja problem za okoliš. Kod primijenjenih PDB-a utvrđena je velika količina alkalija što dovodi do stvaranja većeg udjela staklene faze čime se smanjuje temperatura pečenja. Na taj način bi se smanjila energija potrebna tijekom proizvodnog procesa. Također, zbog udjela organske tvari i kalcijevog karbonata, PDB može djelovati kao sredstvo za stvaranje pora. A. Gómez-Barea i dr. [21] tvrde isto, želeći klasificirati PDB bogat organskom tvari kao sredstvo za stvaranje pora. Ispitujući opeku s 15 i 20 % PDB-a utvrđeno je veliko smanjenje tlačne čvrstoće i gustoće te značajno povećanje apsorpcije vode, usporedno s povećanom poroznosti. Navedeno se pripisuje povećanoj potrebi za vodom tijekom miješanja te utjecaju PDB-a na stvaranje pora.

C. Fernández-Pereira i dr. [22] u svojem su istraživanju također pokazali da je primjena letećeg pepela nastalog izgaranjem biomase (u mjehuričastom fluidiziranom sloju) moguća u proizvodnji opeke u udjelima do 20 %. Pepeo koji je korišten u istraživanju nastaje spaljivanjem otpadnog materijala pri proizvodnji maslinovog ulja (komine masline). Pepeo bogat ugljikom promatran je kao inertni materijal koji će doprinijeti razvoju pora svojom razgradnjom tijekom faze sinteriranja. Očekuje se da će se pepeo tijekom faze sinteriranja ponašati poput organske tvari, stvarajući male šupljine u matrici opeke. Promatran je utjecaj različitih temperatura pečenja opeke, od 1000 °C do 1075 °C. Ispitivanjem konačnih proizvoda utvrđeno je osjetno smanjenje čvrstoće na savijanje nakon sušenja i pečenja te smanjenje gustoće s po-

većanjem udjela pepela. Iako je utjecaj povećanja temperature neznatan, vrijednosti čvrstoća nakon pečenja pri temperaturi od 1075 °C nešto su manje od vrijednosti čvrstoća nakon pečenja pri temperaturi od 1050 °C. Uočeno je veliko smanjenje čvrstoće na savijanje nakon sušenja, no vrijednosti su i dalje dovoljne da bi se opeka mogla dalje obrađivati, odnosno peći. Skupljanje uzoraka također je mjereno nakon faze sušenja i faze pečenja te je zabilježeno povećanje skupljanja s povećanjem temperature pečenja. Skupljanje tijekom sušenja okarakterizirano je kao umjereno. Značajno povećanje upijanja vode povezuje se s povećanom količinom otvorenih pora, no s porastom temperature pečenja upijanje vode opada zbog količine pora koja se također smanjuje povećanjem temperature sinteriranja. Niti kod jednog od opečnih uzoraka nije uočena crna jezgra, koja nastaje zbog nepotpunog izgaranja organske tvari prisutne u glini odnosno mješavini gline i pepela. Što se tiče utjecaja na okoliš, ne očekuju se nikakvi problemi s obzirom na zadovoljavajuće koncentracije teških metala. Samo je koncentracija Mo (molibdena) kod pojedinih uzoraka zabilježena kao neznatno veća od dopuštene razine.

L. Pérez-Villarejo i dr. [16] prikazuju istraživanje utjecaja letećeg pepela dobivenog izgaranjem drva masline, pri čemu su uzorci opeke pečeni na različitim temperaturama (900 i 1000 °C). PDB je zamjenjujući glinu doziran u udjelima od 10, 20 i 30 %. Promatrajući gubitak žarenjem (LOI), dodavanje PDB-a i povećanje temperature rezultiralo je povećanjem LOI, što može biti posljedica većeg udjela organske tvari i karbonata u pepelu. Tlačna čvrstoća opeke smanjena je s povećanjem količine letećeg pepela pri obje temperature pečenja. Volumenska gustoća opeke pečene na 1000 °C veća je od gustoće opeke pečene pri 900 °C što je uvjetovalo i bolja mehanička svojstva. Kapilarno upijanje vode je neznatno povećano s povećanjem količine PDB-a. Vrijednosti toplinske provodljivosti uzoraka s 30 % PDB-a pečenih na 1000 °C manje su za 34 % od toplinske provodljivosti uzoraka bez PDB-a. Skupljanje opeke tijekom procesa pečenja povećalo se s povećanjem količine PDB-a, što se pripisuje oslobađanju plinova koji nastaju tijekom izgaranja organskih tvari i raspadanja karbonata sadržanih u PDB-u i glini. Utjecaj temperature na skupljanje utvrđen je na način da su zabilježene manje vrijednosti skupljanja kod uzoraka pečenih na višoj temperaturi. Vodoupojnost, povezana s otvorenom poroznošću koja se razvija tijekom faze pečenja uzoraka, povećala se s količinom PDB-a pri čemu su manje vrijednosti zabilježene kod uzoraka pečenih na višoj temperaturi. Uobičajeno je da pri višim temperaturama dolazi do porasta vitifikacijske faze, a time i postizanja gušće mikrostrukture. Međutim, na uzorcima s PDB-om uočeno je suprotno s obzirom na smanjenu volumensku gustoću i povećanu vodoupojnost.

Mogućnost primjene PDB-a u proizvodnji opekarske cigle L. Pérez-Villarejo i dr. [23] istražuju smanjujući udio gline do 50 %. Uzorci su izrađeni s 10, 20, 30, 40 i 50 % PDB-a i 10 % vode te pečeni pri 950 °C. Rezultati su pokazali da se apsorpcija vode povećala, a volumenska gustoća i tlačna čvrstoća smanjile s povećanjem količine

PDB-a. Uočena je tendencija da se vodoupojnost povećava s povećanim količinama PDB-a, pri čemu su uzorci s udjelom PDB-a većim od 20 % pokazali neprihvatljive vrijednosti. Kapilarno upijanje opeke također je značajno poraslo s povećanjem količine PDB-a iznad 50 %. Gustoća opeke je upravo suprotna količini PDB-a pa je zamjena 20 % gline PDB-om rezultirala smanjenjem gustoće od 4 %, dok je već sljedeći udio od 30 % uzrokovao znatno veće smanjenje od 16 %. Slični rezultati dobiveni su ispitivanjem tlačne čvrstoće. Kao i u prethodnim istraživanjima, može se zaključiti da zamjenjujući glinenu sirovinu, maksimalni prihvatljivi udio PDB-a iznosi 20 %. Uspoređujući toplinska i mehanička svojstva opeke, B. Beal i dr. [24] promatraju utjecaj različitih sredsata za stvaranje pora, između ostalog i pepela nastalog izgaranjem miješanih drva. Dozirajući PDB u iznosu od 25 % u odnosu na masu gline, promatrana su sljedeća svojstva opeke s PDB-om volumenska gustoća, poroznost, upijanje vode, tlačna čvrstoća, skupljanje i toplinska provodljivost. Uspoređujući opeku s PDB-om s referentnim uzorcima od čiste gline, pečene pri temperaturi od 1060 °C, utvrđeno je da se volumenska gustoća smanjila za 14 %, a poroznost i upijanje vode povećali za 15 % odnosno 33 %. Vrijednosti tlačne čvrstoće opeke sa PDB-om vrlo su bliske referentnim vrijednostima, uz razliku od 9 %. S obzirom na povećanu količinu, odnosno ukupni volumen pora očekivano je smanjenje toplinske provodljivosti. Kod opeke s PDB-om uočen je suprotan trend povećanja toplinske provodljivosti s povećanjem poroznosti opeke zbog organskih ostataka u PDB-u i distribucije pora koje nastaju njegovim izgaranjem. Linearno skupljanje referentnih uzoraka i uzoraka s PDB-om iznosi 4 % i odnosno 2,5 %. Smanjeno skupljanje tumači se na način da je PDB zadržao manju količinu vode koja tijekom sušenja i pečenja isparava i tako uzrokuje skupljanje opeke.

X. Lingling i dr. [15] za razliku od ostalih predlažu zamjenu gline s vrlo velikim udjelima letećeg pepela. Za izradu opečnih uzoraka korišten je pepeo nastao spaljivanjem otpada iz tvornice papira, prikupljan mokrim postupkom. Opeka koja je sadržavala do 80 % pepela izlagana je različitim temperaturama (1000, 1050, 1100 °C) nakon čega su analizirana sljedeća svojstva: tlačna čvrstoća, upijanje vode, volumenska gustoća, prividna poroznost. U obzir je uzeta i finoća pepela. Utvrđeno je kako se indeks plastičnosti mješavina pepela i gline znatno smanjuje s povećanjem količine letećeg pepela te se predlaže anuliranje tog efekta dodavanjem prikladnih dodataka. Općenito, kada je indeks plastičnosti manji od 6,0, opeka se ne može proizvoditi procesom ekstruzije, koja predstavlja najčešće korištenu tehnologiju proizvodnje opeke. Indeks plastičnosti gline iznosio je 13,8, a kod mješavina s udjelom pepela od 50 % iznosio je 9,1, sa 70 % 6,0 i sa 80 % 3,8 pa maksimalno smanjenje iznosi približno 73 %. Uočeno je da se poroznost i upijanje vode povećavaju s udjelom PDB-a, s tim da su pri višim temperaturama pečenja zabilježene manje vrijednosti. Gustoća i tlačna čvrstoća smanjuju se s povećanjem udjela pepela, ali se pri višim temperaturama postižu veće vrijednosti. Promatrajući utjecaj finoće pepela na svoj-

stva pečene opeke potvrđeno je da finije čestice pepela pozitivno utječu na proces sinteriranja odnosno očvršćivanja opeke. Sa 60 % usitnjenog pepela postignute su vrijednosti tlačne čvrstoće veće za 117 %, uspoređujući ih s vrijednostima dobivenim na opeci s krupnijim pepelom. Sa 70 % usitnjenog pepela postignute su vrijednosti tlačne čvrstoće veće za 86 %, dok su sa 80 % usitnjenog pepela postignute vrijednosti tlačne čvrstoće veće za 46 %.

Kizinievic O. i V. [25] analizirali su proizvodnju opeke s pepelom od spaljivanja otpadnih drva želeći smanjiti udio prirodne sirovine. Uzorci su izrađeni ugradnjom od 5 % do 60 % (prosijanog) pepela, koji zamjenjuje glinu te su pečeni pri različitim temperaturama (950 i 1000 °C). Utvrđene su smanjene vrijednosti skupljanja, gustoće, tlačne čvrstoće i toplinske provodljivosti, a povećane poroznosti i upijanja vode. Također je potvrđena mogućnost uporabe pepela kao prirodnog pigmenta s obzirom na to da se njegovim korištenjem smanjuje udio željeza i dobiva opeka svjetlije boje, što je vidljivo već kod udjela pepela većeg od 10 %. Povećanjem udjela pepela povećala se količina pora pri čemu je njihova distribucija podjednaka, bez obzira na udio pepela i minimalni utjecaj više temperature. Analizom mikrostrukture pepela utvrđene su dvije vrste čestica – negorive mineralne čestice (okruglog oblika, zaobljenih rubova i ujednačene strukture) te čestice ugljena (različitih oblika, šuplje, porozne i nejednolike strukture). Skupljanje i upijanje vode smanjuju se s povećanjem udjela pepela, ali i s porastom temperature. Gustoća nije ovisila o povećanju temperature dok je tlačna čvrstoća porasla. S povećanjem udjela pepela iznad 20 % mijenja se mikrostruktura uzoraka te je procijenjeno da se optimalna svojstva opeke postižu do te razine. Toplinska provodljivost opeke značajno se smanjila pri velikim udjelima pepela, ali je minimalno ovisila o temperaturi pečenja.

E. Bouet Martinez i dr. [26] predlažu ugrađivanje letećeg pepela, dobivenog spaljivanjem komina maslina, u glinenu opeku kao ekonomično i održivo rješenje problema odlaganja otpada. Smanjujući udio gline, leteći pepeo od biomase doziran je u udjelima od 5, 10, 15, 20 i 25 %. Uzorci su proizvedeni od homogenizirane mješavine gline i pepela koja je umiješana s 10 % vode, nakon čega je opeka osušena te pečena na temperaturi od 950 °C. Karakterizacijom keramičkih kompozita proučavana su sljedeća svojstva: upijanje vode i kapilarno upijanje opeke, volumenska gustoća i poroznost, gubitak žarenjem, linearno skupljanje i tlačna čvrstoća. Upijanje vode i kapilarno upijanje uzoraka s pepelom povećalo se s porastom udjela pepela, s time da su maksimalne vrijednosti upijanja zabilježene kod uzoraka s 10 i 15 % pepela. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće pokazuju sličan trend kao i upijanje vode, odnosno veliku korelaciju s količinom pora koja raste s porastom udjela pepela, ali samo do udjela od 15 % nakon čega naglo pada. Najveća vrijednost tlačne čvrstoće, veća i od referentne vrijednosti, zabilježena je kod uzorka s 5 % pepela. Uspoređujući rezultate ispitivanja skupljanja utvrđeno je da se uzorci izrađeni samo od čiste gline skupljaju 2,9 % dok je kod uzoraka s letećim pepelom linearno skupljanje doseglo

maksimalnu vrijednost s udjelom pepela od 20 % iznoseći 1,02 %. Temeljem dobivenih rezultata zaključeno je da se, bez obzira na smanjenje tlačne čvrstoće, udio gline do 25 % može zamijeniti pepelom biomase bez značajnog smanjenja kvalitete gotovih proizvoda.

#### **4 Ciljevi daljnjeg istraživanja i očekivani doprinos**

Pregledom stanja znanja u području proizvodnje opeke s PDB-om uočena je nužnost povezivanja varijabilnog sastava raznih PDB-a sa svojstvima trajnosti gotovih proizvoda kako bi se mogao odrediti optimalni udio PDB-a kojim se može zamijeniti glina. S obzirom na pretpostavku da će dodavanjem PDB-a, pri pečenju opeke nastati dodatna količina pora, potrebno je odrediti njegov utjecaj na strukturu pora. Povezivanjem svojstava sirovina i uvjeta proizvodnje, odnosno pravilnim odabirom sirovina (zamjenom gline s kompatibilnim PDB-om) uz primjenu odgovarajuće temperature pečenja opeke ostvarila bi se povoljna distribucija pora, osiguravajući tako željenu trajnost gotovog proizvoda. S ekološkog stajališta, ponovna upotreba PDB-a u opekarskoj industriji imala bi pozitivan utjecaj na smanjenje emisije CO<sub>2</sub> koji nastaje pri proizvodnji opekarskih proizvoda, očuvanje prirodnih resursa koji se koriste u njihovoj proizvodnji te na rješavanje problema o postupanju s PDB-om. Očekivani doprinos građevinskoj industriji jest potvrda hipoteze da se primjenom PDB-a mogu proizvesti opekarski proizvodi traženih svojstava bez narušavanja kvalitete. Na taj bi se način pridonijelo razvoju kružne ekonomije i povećala konkurentnost opekarskih proizvoda na tržištu.

#### **5 Zaključak**

Zamjenom dijela sirove gline u proizvodnji opeke s otpadnim materijalima, kao što je pepeo dobiven spaljivanjem drvene biomase, ostvaruje se pozitivan doprinos očuvanju prirodnih resursa. Navedeno također rezultira smanjenjem troškova koji proizlaze iz eksploatacije sirove gline iz prirode, istovremeno rješavajući problem postupanja s otpadnim pepelom. Pregledom dosadašnjih istraživanja utvrđena je opravdanost proizvodnje opekarskih materijala s dodanim pepelom biomase u maksimalnom udjelu od 20 % do 25 %. Na ovaj način želi se kategorizirati PDB ne kao otpad, već kao vrijednu sirovinu primjenjivu kao građevni materijal kompatibilan s tradicionalnim materijalima. Međutim, u obzir treba uzeti da je jedan od primarnih ciljeva proizvođača opeke svakako optimizacija proizvodnje i minimiziranje operativnih troškova. Činjenica da se ugradnjom pepela u opeku može pridonijeti smanjenju energije potrebne u fazi pečenja opeke, koja predstavlja najveći trošak u cjelokupnom procesu proizvodnje, ide u prilog implementaciji novog materijala u već ustaljenu proizvodnju. S obzirom na to da je po kemijskom sastavu PDB-a i gline



utvrđen potencijal primjene takvih pepela u proizvodnji opeke te s obzirom na uobičajeni smještaj tvornica opeke u blizini ležišta gline, prednost se daje lokalno dostupnim pepelima. Važno je da opeka s PDB-om bude konkurentna klasičnoj opeci pa je potrebno iznaći kompromis između količine ugrađenog pepela te svojstava trajnosti gotovih proizvoda. Što se tiče skupljanja, različiti PDB-ovi imaju različit utjecaj, odnosno vrijednosti skupljanja se dodatkom pepela negdje smanjuju, a negdje povećavaju. Korištenje pepela može biti osobito atraktivno ako se njegovom primjenom postigne dodana vrijednost, kao primjerice opekarski proizvodi male gustoće i poboljšanih toplinsko-izolacijskih svojstava. Varijabilnost kemijskog sastava može se promatrati kao eventualno ograničenje kod šire primjene PDB-a. Stoga su stroga kontrola kvalitete u svim fazama proizvodnje te dodatna istraživanja zbog različitih i promjenjivih kemijskih sastava pepela iz različitih izvora nužna kako bi se omogućila njihova šira primjena. Kemijski sastav same gline također ima velik utjecaj na trajnost opeke, zbog čega je potrebno minimizirati utjecaj varijabilnog sastava PDB-a na primarnu sirovinu. Metodološki okvir koji bi omogućio objektivno vrednovanje optimalnog udjela PDB-a u opeci obuhvaća detaljnu karakterizaciju PDB-a i njegove kvalitete te u konačnici odabir parametara čijim bi se ispitivanjem dobila razvidna i nedvojbeno ocjena trajnosti takvih proizvoda.

## Zahvala

Istraživanja prikazana u ovom radu provedena su u okviru projekata “Transformacija pepela iz drvene biomase u građevne kompozite s dodanom vrijednošću - TAREC<sup>2</sup>” (IP-06-2016) i “Projekt razvoja karijera mladih istraživača – izobrazba novih doktora znanosti” DOK-01-2018 koje financira Hrvatska zaklada za znanost.

## Literatura

- [1] Europski parlament, DIREKTIVA (EU) 2018/2001 EUROPSKOG PARLAMENTA I VIJEĆA od 11. prosinca 2018. o promicanju uporabe energije iz obnovljivih izvora (preinaka), Službeni list Eur. unije, (2018) (L 328/82-209).
- [2] European Commission, State of play on the sustainability of solid and gaseous biomass used for electricity, heating and cooling in the EU, Comm. Staff Work. Doc., (2014), doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- [3] De Brito, J., Agrela, F., eds., New trends in Eco-efficient and recycled concrete, 1st ed., Woodhead Publishing, 2018.
- [4] European Commission, A Clean Planet for all - A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy, (2018) (1–25).



- [5] Šegon, V., Šimek, T., Oradini, A., Marchetti, M., Priručnik za učinkovito korištenje biomase, Hrvatski šumarski institut, 2014.
- [6] The European Commission's Knowledge Center for Bioeconomy, Brief on biomass for energy in the European Union, (2016) (1–8), doi:10.2760/546943.
- [7] Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L.K., Vassileva, C.G., An overview of the composition and application of biomass ash., *Fuel*, 105, (2012) (19–39), doi:10.1016/j.fuel.2012.10.001.
- [8] Eliche-Quesada, D., Felipe-Sesé, M.A., Martínez-Martínez, S., Pérez-Villarejo, L., Comparative Study of the Use of Different Biomass Bottom Ash in the Manufacture of Ceramic Bricks, *J. Mater. Civ. Eng.*, 29, (2017) (04017238), doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002078.
- [9] Direktiva Europskog parlamenta, DIREKTIVA (EU) 2018/851 EUROPSKOG PARLAMENTA I VIJEĆA od 30. svibnja 2018. o izmjeni Direktive 2008/98/EZ o otpadu, *Službeni list Eur. unije*, (2018) (L 150/109-140).
- [10] Europski parlament, DIREKTIVA (EU) 2018/850 EUROPSKOG PARLAMENTA I VIJEĆA od 30. svibnja 2018. o izmjeni Direktive 1999/31/EZ o odlagalištima otpada, *Službeni list Eur. unije*, (2018) (L 150/100-108).
- [11] Netinger, I., Vračević, M., Bačkalić, Z., Opeka - od sirovine do gotovog proizvoda, Osijek, 2014.
- [12] Zhang, Z., Wong, Y.C., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., A review of studies on bricks using alternative materials and approaches, *Constr. Build. Mater.*, 188, (2018) (1101–1118), doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.08.152.
- [13] Eliche-Quesada, D., Felipe-Sesé, M.A., Moreno-molina, A.J., Franco, F., Infantes-molina, A., Investigation of using bottom or fly pine-olive pruning ash to produce environmental friendly ceramic materials, *Appl. Clay Sci.*, (2016), doi:10.1016/j.clay.2016.10.015.
- [14] Brick Development Association, BRICK Sustainability Report 2016, Brick Dev. Assoc. Website, (2016) (45). <http://www.brick.org.uk/admin/resources/brick-sustainability-report-2016-1.pdf>.
- [15] Lingling, X., Wei, G., Tao, W., Nanru, Y., Study on fired bricks with replacing clay by fly ash in high volume ratio, *Constr. Build. Mater.*, 19, (2005) (243–247), doi:10.1016/j.conbuildmat.2004.05.017.
- [16] Pérez-Villarejo, L., Eliche-Quesada, D., Carrasco-Hurtado, B., Sánchez-Soto, P.J., Valorization of Olive Biomass Fly Ash for Production Eco-Friendly Ceramic Bricks, *Ref. Modul. Mater. Sci. Mater. Eng.*, (2019) (1–10), doi:10.1016/B978-0-12-803581-8.11547-4.

- [17] Brick Development Association, BRICK Sustainability Report 2016, Brick Dev. Assoc. Website, (2016) (45).
- [18] Štirmer, N., Carević, I., Baričević, A., Milovanović, B., Serdar, M., Banjad Pečur, I., Jelčić Rukavina, M., Bjegović, D., TAREC2 - Stanje područja o primjeni PDB - a u građevinskoj industriji, (2017).
- [19] Carević, I., Serdar, M., Štirmer, N., Ukrainczyk, N., Preliminary screening of wood biomass ashes for partial resources replacements in cementitious materials, *J. Clean. Prod.*, 229, (2019) (1045–1064), doi:10.1016/j.jclepro.2019.04.321.
- [20] Al-fakih, A., Mohammed, B.S., Liew, M.S., Nikbakht, E., Incorporation of waste materials in the manufacture of masonry bricks : An update review, *J. Build. Eng.*, 21, (2019) (37–54), doi:10.1016/j.jobe.2018.09.023.
- [21] Gómez-Barea, A.; Vilches, L. F.; Leiva, C.; Campoy, M.; Fernández-Pereira, C., Plant optimisation and ash recycling in fluidised bed waste gasification, *Chem. Eng. J.*, 146, (2009) (227–236), doi:10.1016/j.cej.2008.05.039.
- [22] Fernández-Pereira, C.; De La Casa, J. A.; Gómez-Barea, A.; Arroyo, F.; Leiva, C.; Luna, Y., Application of biomass gasification fly ash for brick manufacturing, *Fuel*, 90, (2011) (220–232), doi:10.1016/j.fuel.2010.07.057.
- [23] Pérez-Villarejo, L.; Eliche-Quesada, D.; Iglesias-Godino, Fco. J.; Martínez-García, C.; Corpas-Iglesias, F.A., Recycling of ash from biomass incinerator in clay matrix to produce ceramic bricks, *J. Environ. Manage.*, (2012) (349–354), doi:10.1016/j.jenvman.2010.10.022.
- [24] Beal, B., Selby, A., Atwater, C., James, C., Viens, C., A Comparison of Thermal and Mechanical Properties of Clay Bricks Prepared with Three Different Pore-Forming Additives : Vermiculite , Wood Ash , and Sawdust, (2019) (1–10), doi:10.1002/ep.13150.
- [25] Kizinievič, O., Kizinievič, V., Utilisation of wood ash from biomass for the production of ceramic products, *Constr. Build. Mater.*, 127, (2016) (264–273), doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.124.
- [26] Bonet-martínez, E., Pérez-villarejo, L., Eliche-quesada, D., Sánchez-soto, P.J., Carrascohurtado, B., Manufacture of sustainable clay ceramic composite with composition  $\text{SiO}_2$  -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> -CaO-K<sub>2</sub>O materials valuing biomass ash from olive pomace, 229, (2018) (21–25), doi:10.1016/j.matlet.2018.06.105.



# Proračun ponašanja u potresu armiranobetonskih postojećih i nadograđenih zgrada

Shala Alush<sup>1</sup>, doc.dr.sc. Jelena Bleiziffer<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Alb-Architect d.o.o Prishtina, alushshala@albarchitect.com

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, jbleiziffer@grad.hr

## Sažetak

U radu je prikazan proračun postojeće zgrade s dvoetažnom nadgradnjom. Proveden je potresni proračun triju modela i analizirana uključenost starog betona u nosivost. Za potrebe proračuna korišteni su rezultati ispitivanja betona postojeće konstrukcije te geomehnička ispitivanja temeljnog tla. Primjer prikazan u radu služi kao polazište za definiranje programa istraživanja kojim bi se razradila metodologija za analizu u slučaju nadogradnje, osobito kroz istraživanja zajedničkog djelovanja stare i nove konstrukcije.

*Ključne riječi: nadgradnja, nosivost, numerički model, stari beton, potres*

## Analysis of existing reinforced concrete buildings and buildings with additional floors under seismic load

### Abstract

The paper presents the analysis of an existing building with an addition of two floors. Seismic analysis was carried out on three different models. Results obtained by concrete compressive strength testing and geotechnical testing were included in the calculations. The discussion presented in this paper serves as a starting point for defining a research programme aimed at developing methodology on how to approach such works, with an emphasis on the study of interaction between new and old structures.

*Key words: additions to buildings, load-carrying capacity, numerical model, old concrete, earthquake*

## 1 Uvod

Modalni i potresni proračun često su odlučujući za određivanje nosivosti postojeće zgrade. Modalnim proračunom određuju se dinamički parametri zgrade kao što su period, frekvencija i drugi potrebni za daljnju analizu i konačni projekt. Nakon definiranja dinamičkih parametara određuje se potresni odziv, odnosno odgovarajuće unutarnje sile [1]. Dodatno pitanje kod postojećih konstrukcija odnosi se na trajnost konstrukcije u cjelini te njenih pojedinačnih elemenata, pa će duljina i uvjeti njihove prethodne uporabe (uključivo izlaganje klimatskim utjecajima) imati utjecaja na iznalaženje primjerenog projektnog rješenja sanacije odnosno nadogradnje. Veza između elemenata u konstrukciji nije samo statički proces. To je i vremenski proces u kojem se odnos mijenja u funkciji vremena [2], a sudjelovanja starih elemenata u otpornosti i stabilnosti građevine uvelike ovisi o upotrebljenim koeficijentima sigurnosti.

Djelovanje potresa je često dominantno za dimenzioniranje [3]. U ovom radu prikazan je proveden numerički proračun jednog objekta, pri čemu su upotrijebljeni rezultati ispitivanja uzetih uzoraka betona te geotehničkih ispitivanja temeljnog tla. Pri proračunu uzeto je u obzir seizmičko djelovanje kao horizontalni spektar 1 prema EC8 [4], opterećenje zgrade s dodatnim katovima i ostala statička vanjska opterećenja prema EC1 i EC2. Kao podloga upotrijebljen je arhitektonski projekt nadogradnje i rezultati ispitivanja provedeni na licu mjesta. Analize modela rađene su računalnim programom temeljenim na modelu konačnih elemenata uzimajući u obzir i konstrukcijsko-inženjersku praksu. U zaključku su uspoređeni rezultati nekoliko modela za promatranim građevinama te komentirane smjernice daljnjih istraživanja.

## 2 Opis građevine

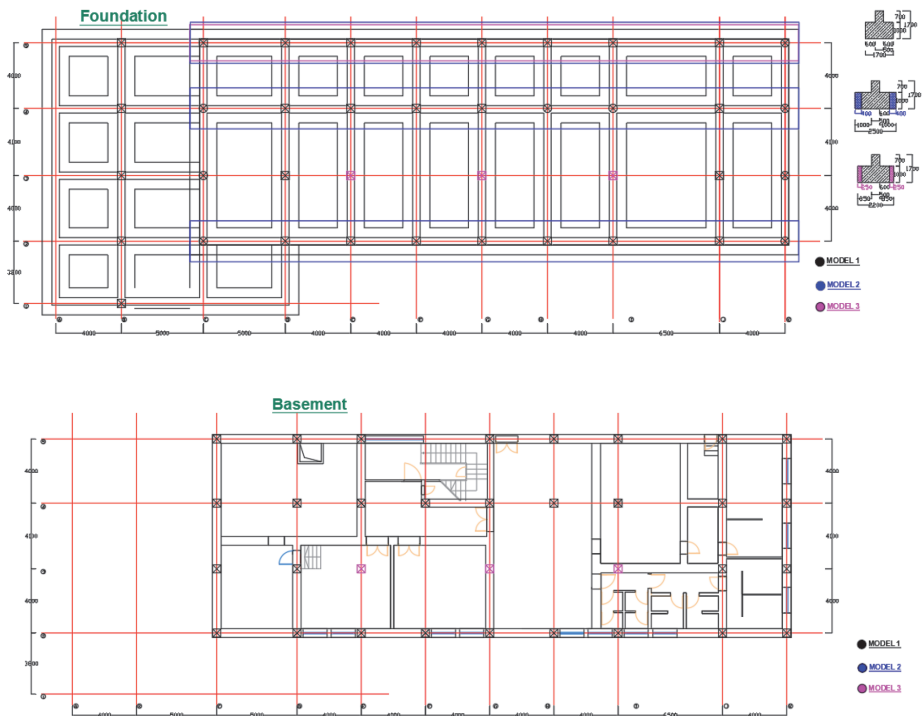
Građevina je dio Ministarstva rada i socijalne skrbi (MRSS) u Prištini, izgrađena 1960-ih godina. Postojeća zgrada ima podrum, prizemlje i dva kata, a sada se ukazala potreba za MRSS da se zbog nedostatka uredskog prostora izvede nadogradnja 2017. godine. Izrađen je Projekt za renoviranje koji u skladu sa zahtjevima Ministarstva uključuje dva dodatna kata. Dimenzije postojeće građevine su  $L \times B \times H = 45,00 \times 16,00 \times 13,50$  m. Elementi imaju konstantnu visinu  $h = 3,3$  m od poda do stropa; osi su na različitoj udaljenosti od  $l_x = 4,0$  m do  $l_x = 6,5$  m, dok je u drugom smjeru udaljenost između osi  $l_y = 3,80$  m do  $l_y = 4,10$  m. Nosiva konstrukcija uključuje AB nosive zidove u podrumu  $t = 50$  cm razreda čvrstoće betona C25/30, unutarnje zidne nosače od opeke  $D = 50$  cm, AB stupove  $50 \times 50$  cm razreda čvrstoće betona C35/45 s kružnom spiralnom armaturom te grede dimenzija  $b \times h = 50 \times 50$  cm od betona C30/37 oslonjene na stupove. Temelji su izvedeni kao temeljna traka od nearmiranog betona C25/30 u uzdužnom i poprečnom smjeru građevine u obliku obrnutog slova "T", dimenzija  $B \times H \times b \times h = 170 \times 160 \times 50 \times 100$  cm. Armatura koja je korištena u građevini je glatka armatura S240/360. Međukat-

na konstrukcija je „Avramenko“ sustav dimenzija  $b_1 \times b_2 \times h = 12 \times 15 \times 50 \text{ cm}$  s pločom  $d = 5 \text{ cm}$ . Razmak rebara je  $l_x = 50 \text{ cm}$ . Izvedena je od betona razreda čvrstoće C30/37, i oslanja se na grede i uzdužne zidove zgrade.

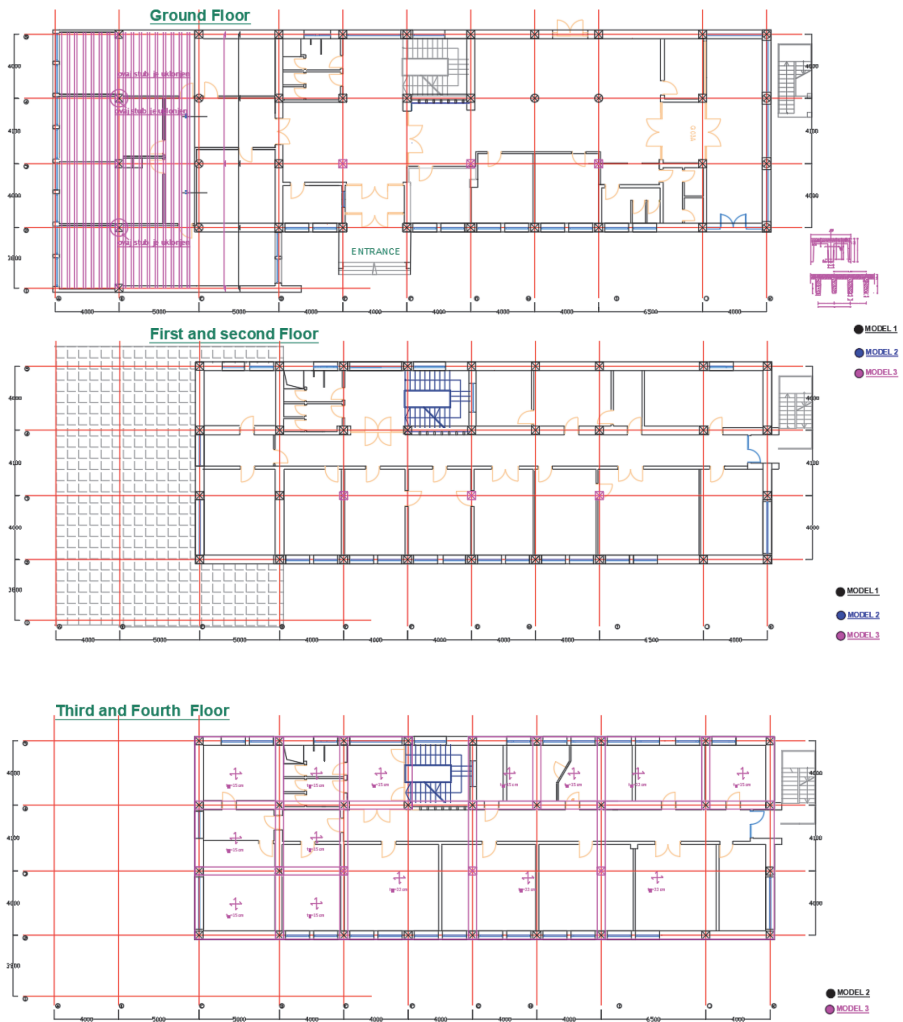
Na slici 1. prikazana je postojeća zgrada. Na slici 2. prikazani su preklopljeni tlocrti različitih analiziranih modela, po pojedinim etažama.



Slika 1. Zgrada Ministarstva rada i socijalne skrbi (MRSS)



Slika 2. Tlocrti zgrada za modele 1, 2 i 3: temelji, podrum, prizemlje, prvi kat, drugi kat te treći i četvrti kat



Slika 2. Tlocrta zgrada za modele 1, 2 i 3: temelji, podrum, prizemlje, prvi kat, drugi kat te treći i četvrti kat

Model predložene varijante nadogradnje koju je investitor odobrio i dostavio gradskom tijelu za građevinsku dozvolu prikazan je na slici 3.



Slika 3. Projektirana građevina

### 3 Numerički proračun

Razmatrana su tri modela te uspoređeni dobiveni rezultati. Ispitivanjima su određene sljedeće karakteristike postojećih materijala koji se upotrebljavajau u modelima: temelji i zidovi podruma MB 30 = C25/30; stupovi MB 45 = C35/45; međukatni elementi tj. rebrasta ploča je MB 35 = C30/37, armatura je S-240/360, a geomehaničkim ispitivanjima određene su sljedeće karakteristike tla:  $q_a = 154,52 \text{ kN/m}^2$ ,  $k_c = 15$ ,  $C = 15 \text{ kN/m}^2$ ,  $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ ,  $\phi = 21^\circ$ ,  $K = 20000 \text{ kN/m}^3$ .

#### 3.1 Model 1

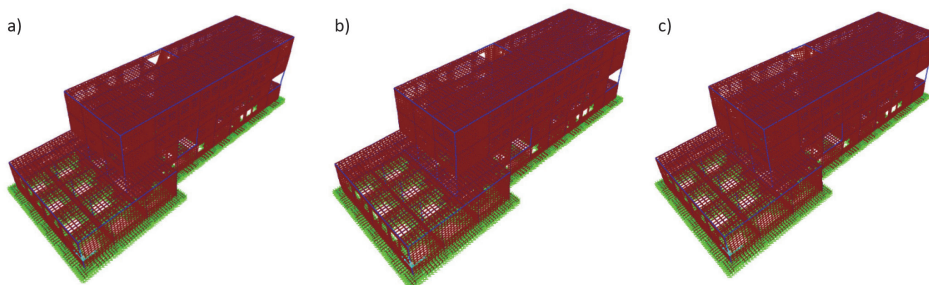
Model 1 je postojeća građevina s karakteristikama materijala prema provedenim ispitivanjima, a napravljen je u računalnom programu SAP 2000. Dobiveni rezultati prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Rezultati za model 1

| Modalni oblik   | Frekvencija [Hz] | Period [s] | Prigušenje [%] | Krutost tla [ $\text{kN/m}^3$ ] |
|-----------------|------------------|------------|----------------|---------------------------------|
| Translacija Y-Y | 2,38             | 0,42       | 5,0            | 20000                           |
| Translacija X-X | 2,64             | 0,38       | 5,0            | 20000                           |
| Torzija         | 3,01             | 0,33       | 5,0            | 20000                           |



Pri proračunu upotrebljeni su konačni elementi dimenzija minimalno 0,4 x 0,4 m. Opterećenja su uzeta u skladu s Eurokodom EC1, gdje je za pod uzeto  $g = 3,0 \text{ kN/m}^2$ , što uključuje pregradne zidove od knaufa kao lakog materijala, na krovu je  $g = 4,5 \text{ kN/m}^2$ , korisno opterećenje je  $q = 3,0 \text{ kN/m}^2$  na etažama i  $1,5 \text{ kN/m}^2$  za ravne krovove, snijeg je  $s = 1,25 \text{ kN/m}^2$ . Potresno opterećenje je uzeto prema EC8.



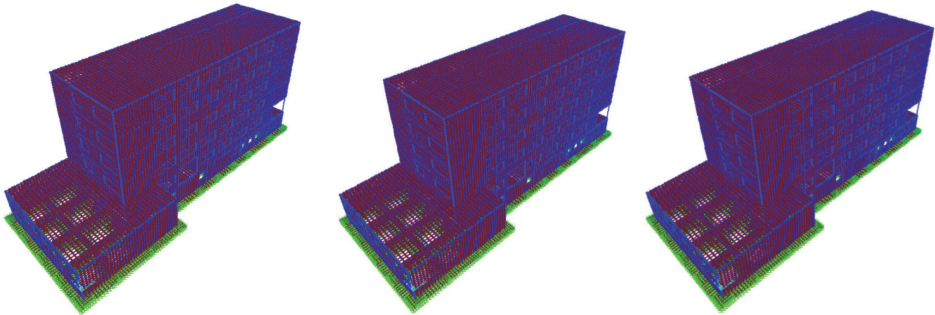
Slika 4. a) Translacija Y-Y postojeće zgrade; b) Translacija X-X postojeće zgrade; c) Torzija postojeće zgrade

### 3.2 Model 2

Model 2 uključuje izgradnju dva nova kata na staroj zgradi, a konstrukcija je izvedena betonom C30/37 za sve nosive elemente. Nosivi zidovi se nastavljaju kontinuirano, ali se koriste blokovi s manje otvora (30 %) i debljine  $d = 25 \text{ cm}$ . Stupovi se nastavljaju jednakih dimenzija  $b \times h = 50 \times 50 \text{ cm}$ , grede su  $b / h = 50 / 50 \text{ cm}$ , ploče s rebrima  $b_1 / h_1 = 15 / 50 \text{ cm}$ . Opterećenja su prema EC1, a potres prema EC8 te karakteristike tla prema geomehaničkom elaboratu. Rezultati na ovom modelu prikazani su u tablici 2.

Tablica 2. Rezultati za model 2

| Modalni oblik   | Frekvencija [Hz] | Period [s] | Prigušenje [%] | Krutost tla [ $\text{kN/m}^3$ ] |
|-----------------|------------------|------------|----------------|---------------------------------|
| Translacija Y-Y | 1,47             | 0,68       | 5,0            | 20000                           |
| Translacija X-X | 1,61             | 0,62       | 5,0            | 20000                           |
| Torzija         | 1,79             | 0,56       | 5,0            | 20000                           |



Slika 5. a) Translacija Y-Y nadograđenih zgrada, b) Translacija X-X nadograđenih zgrada, c) Torzija nadograđenih zgrada

### 3.3 Model 3

Model 3 ima povećanu korisnu ploštinu građevine, ali s intervencijom u statičkom sustavu, gdje su na nadograđenim katovima predviđena tri stupa koji prenose dio opterećenja. Stupovi su  $b/h = 50/50$  cm, te su predviđene ploče  $t_1 = 15$  cm na manjim i  $t_2 = 22$  cm na većim rasponima. Također su nastavljeni postojeći stupovi. Kao i za prethodne modele, proračun je proveden pomoću programa SAP2000 uz ista opterećenja. Rezultati su prikazani u tablici 3.

Tablica 3. Rezultati za model 3

| Modalni oblik   | Frekvencija [Hz] | Period [s] | Prigušenje [%] | Krutost tla [ $\text{kN/m}^3$ ] |
|-----------------|------------------|------------|----------------|---------------------------------|
| Translacija Y-Y | 1,61             | 0,62       | 5,0            | 20000                           |
| Translacija X-X | 1,71             | 0,585      | 5,0            | 20000                           |
| Torzija         | 1,81             | 0,55       | 5,0            | 20000                           |

U tablici 4. prikazana je usporedba frekvencija i perioda za tri modela. Karakteristike tla su jednake za sve modele.

Tablica 4. Usporedba frekvencija i period za tri modela

| Modalni oblik   | Model 1          |            | Model 2          |            | Model 3          |            |
|-----------------|------------------|------------|------------------|------------|------------------|------------|
|                 | Frekvencija [Hz] | Period [s] | Frekvencija [Hz] | Period [s] | Frekvencija [Hz] | Period [s] |
| Translacija Y-Y | 2,38             | 0,42       | 1,47             | 0,68       | 1,61             | 0,62       |
| Translacija X-X | 2,64             | 0,38       | 1,61             | 0,62       | 1,71             | 0,585      |
| Torzija         | 3,01             | 0,33       | 1,79             | 0,56       | 1,81             | 0,55       |

Iz ovih rezultata proizlazi da se radi o građevini s velikom krutošću gdje, čak i uz promjene uslijed krovne nadgradnje, imamo visoku krutost koja ne prelazi period  $T = 1,0$  s.

#### 4 Proračun na potres i udio starog betona u nosivosti zgrade

Proračun zgrade na potres proveden je u skladu s regulativom: The European Union Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC odnosno normom EN 1998-1:2004. Mjerodavno potresno opterećenje uzeto je prema geomehaničkom izvještaju kao  $a_g / g = 0,20$  [5]. Uzeto je: faktor  $q = 2,75$ , tlo kategorije C, prigušenje 5 %. Tretman modela temelji se na rezultatima dobivenim na terenu. Kod izračunavanja modela tla koeficijenti se dobivaju iz geomehaničkih obrada i  $K = 20000$  kN/m<sup>3</sup>, a dobivani rezultati prikazani su u tablici 5. Utjecaji na konstrukciju su takvi da ih postojeća konstrukcija prihvaća bez većih promjena.

Proračuni su napravljeni sa SAP2000 programskim paketom, a vrijednosti za dimenzioniranje betonskog elementa su iz najnepovoljnijih kombinacija za dimenzionirane elemente. Sudjelovanje stare konstrukcije prikazano je u tablici 5. Planovi armature iz prvobitnog projekta nisu bili na raspolaganju. Prema EC8-1: 2004, konstrukcija je kategorizirana sa srednjom M duktilnošću zbog prisutnosti potpornih zidova. Projektirana nosivost konstrukcijskih elemenata u odnosu na stvarne statičke i seizmičke utjecaje postoji i ispunjava projektirane uvjete. S obzirom da je sudjelovanje statičkih i dinamičkih utjecaja na modalni račun u smjeru X-X je udio statičkog opterećenja 96,8 %, a dinamičkoga 53,60 %, u smjeru Y-Y je udio statičkog opterećenja 96,9 %, a dinamičkoga 54,70 %. Proračun sudjelovanja starog betona u nosivosti konstrukcije zgrade u odnosu na dodatno ugrađenom betonu uzet je na osnovi ukupnog upotrebljenog volumena.

Tablica 5. Usporedba sudjelovanja dijelova konstrukcije u nosivosti

| Aktivnost                        | Model 1 | Model 2 | Model 3 |
|----------------------------------|---------|---------|---------|
| Udio starog betona u nosivosti   | 67 %    | 45 %    | 45 %    |
| Uporaba betona                   | 45 %    | 72 %    | 80 %    |
| Udio zidova od opeke u nosivosti | 33 %    | 20 %    | 15 %    |
| Udio novougrađenog betona        | 0 %     | 35 %    | 40 %    |

## 5 Zaključak

Iz provedene analize zaključujemo da kod svih promatranih modela imamo veliku krutost građevine koja može uspješno izdržati potresne utjecaje koji se predviđaju na području na kojem se nalazi zgrada. U slučaju drugog modela potrebna je intervencija samo u širini temelja zbog povećanja opterećenja. Najugroženiji elementi koji se nalaze na granici nosivosti su srednji stupovi koji su opterećeni otprilike trećinom ukupnog opterećenja zgrade. Također je u tom slučaju udio koji preuzima stari dio najveći.

U trećem modelu imamo veću intervenciju u statički sustav i konstrukciju građevine. Pri tome se smanjuje sudjelovanje stare konstrukcije te je potrebna manja intervencija na temeljima. Zahtijevaju se veća ulaganja, ali se s obzirom na osiguranje otpornosti i stabilnosti, ta ulaganja mogu opravdati u smislu povećane sigurnosti za korisnike.

Problematika nadogradnje postojećih zgrada, a što nužno uključuje i proračun postojeće zgrade, vrlo je izražena na Kosovu. U radu je prikazan samo jedan od primjera različitih modela pristupa rješavanju nadogradnje, a koji služi kao polazište za definiranje programa istraživanja kojim bi se razradila metodologija za proračun u slučaju nadogradnje, osobito kroz istraživanja zajedničkog djelovanja stare i nove konstrukcije.

## LITERATURA

- [1] Chopra, A.: Dynamics of structures-Theory and Applications to Earthquake Engineering, University of California at Beekelley, Fourth Edition,2011
- [2] Radić, J.: Trajnost konstrukcija 1, Sveučilište u Zagrebu, 2010.
- [3] Meskouris, K., Hinzen, G-Klaus, Bautenweg, Ch., Mistler, M.: Bauwerke und Erdbeben, 2 auflage, Wiesbaden2007
- [4] Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]- EN 1998-1 :2004 EN 1998-1 :2004 (E)
- [5] Elezaj, Z.: Seismotectonic Settings of Kosova, University of Prishtina, J. Int. Environmental Application & Science, Vol. 4 (2): 167-176 (2009)
- [6] Shala, A., Bleiziffer, J.: Reconstruction of floor slabs made of reinforced concrete (ribbed system “Avramenko”) over 50 years old, IV.ECOCEE, Istanbul, 2019



# Utjecaj elastičnog pričvršćenja željezničkog kolosijeka na širenje buke i vibracija

Mate Ivančev<sup>1</sup>, doc.dr.sc. Ivo Haladin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, mivancev@grad.hr

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, ihaladin@grad.hr

## Sažetak

Problem buke i vibracija nastalih prometovanjem željezničkih vozila najizraženiji je u urbanim sredinama, a sustavno rješavanje tog problema započinje detekcijom izvora, određivanjem intenziteta i mehanizama širenja buke i vibracija. Uloga kolosijeka u emisiji buke i vibracija je predmet mnogih istraživanja, kao i utjecaj elastičnog pričvršćenja na vibroakustična svojstva željezničkog sustava. U radu su dane neke od metoda koje se primjenjuju u Europskoj uniji. Njima se određuju dinamička svojstva kolosiječne konstrukcije i optimiziraju elementi kolosijeka koji utječu na širenje buke i vibracija.

*Ključne riječi: buka, vibracije, kolosijek, elastični kolosiječni pribor, dinamička svojstva kolosiječne konstrukcije*

## Impact of elastic rail fastening system on noise and vibration emissions

### Abstract

The issue of noise and vibrations caused by the use of rail vehicles is most relevant in urban areas. A systematic approach to the noise and vibration mitigation starts with the detection of their source, and with the determination of their intensity and propagation mechanisms. The contribution of rail tracks to the emission of noise and vibrations, and the impact of elastic fastening devices on vibroacoustic properties of railway systems, have been in the focus of many research projects. Some of the methods used in the European Union are presented and analysed in the paper. These methods are used to determine dynamic properties of the rail track structure, and to optimise components of rail track elements, the aim being to contribute to the noise and vibration abatement.

*Key words: noise, vibrations, rail track, elastic fastening system, dynamic track properties*

## 1 Uvod

### 1.1 Problematika buke i vibracija prilikom prometovanja željezničkih vozila

Sve veći broj ljudi koji živi u gradskim i prigradskim zonama izložen je raznim negativnim utjecajima koji su posljedica života na takvim područjima. U urbanim sredinama problemi buke i vibracija od tračničkog prometa naglašeni su zbog blizine željezničke infrastrukture i okolnih građevina u kojima ljudi žive i rade. Potrebno je odrediti glavne izvore i mehanizme širenja buke i vibracija te načine njihove eliminacije ili smanjenja do prihvatljivih granica. Izvori buke i vibracija pri prometovanju tračničkih vozila mogu se odrediti numeričkim simulacijama međudjelovanja kotača i tračnica, provođenjem eksperimentalnih ispitivanja ili kombinacijom tih dviju metoda [1]. Prilikom kretanja vozila po kolosijeku kotač je u interakciji s tračnicom, što dovodi do pojave horizontalnih i vertikalnih vibracija. Proces nastanka vibracija od tračničkog prometa, njihovo širenje okolnim tлом te utjecaj na građevine i ljude vrlo je kompleksan zbog velikog broja parametara koji na njega utječu te, unatoč brojnim istraživanjima, još uvijek nije u potpunosti razjašnjen. U Republici Hrvatskoj dosad nisu donesene norme ni propisi koji se odnose na karakteristične i granične vrijednosti vibracija kojima ljudi smiju biti izloženi, no neke zemlje Europske unije, primjerice, Njemačka, Švedska, Norveška, Danska imaju definirane norme koje propisuju te vrijednosti [2]. U Europskoj uniji na snazi je uredba Europske komisije br. 1304/2014 [3] koja propisuje maksimalne razine buke koje željeznička vozila smiju emitirati. Uredbom je propisana norma HRN EN ISO 3095:2013 [4] prema kojoj je potrebno odrediti maksimalnu razinu buke pri prolasku vlaka. Stanje kolosijeka na kojem se ispituje buka pri prolasku vozila mora zadovoljiti normu HRN EN 15610:2009 [5] koja se odnosi na neravnost vozne površine tračnice te HRN EN 15461:2011 [6] koja se odnosi na stupanj prigušenja vibracija kolosiječne konstrukcije. Određivanjem tih parametara kolosiječne konstrukcije moguće je odrediti udio kolosijeka u ukupnim razinama buke pri prolasku vlaka. Motori vozila, aerodinamična buka pri velikim brzinama te kontakt kotača vozila i tračnice glavni su izvori buke i vibracija. Brzina prometovanja glavni je parametar koji utječe na dominantne izvore buke, pa je buka od motora vozila prevladavajuća pri brzinama do 20 km/h, kotrljanja kotača po tračnicama od 20 km/h do 250 km/h, dok je pri višim brzinama dominantan izvor aerodinamična buka [7].

### 1.2 Mehanizam širenja buke i vibracija na sučelju kotača i tračnice

Vožnja čeličnih kotača po čeličnim tračnicama predstavlja snažan izvor vibracija, a time i buke. Većina kotača nije savršeno okrugla, a dodatne nepravilnosti u njihovoj geometriji koje nastaju tijekom uporabe (razna oštećenja i stvaranje plosnatih

mjesta uslijed kočenja) uzrokuju pojavu periodičnih sila prilikom kontakta takve nepravilnosti s tračnicom koja je također neravna. Neravnosti većih valnih duljina uzrokuju značajna dinamička naprezanja u tračnicama, stradavanje pričvrsnog pribora, zastornog materijala te uranjeni zamor čelika na voznoj površini tračnica [8]. Naboranost malih valnih duljina naziva se još i akustična neravnost tračnica, te izaziva visokofrekvencijske vibracije tračnica i kotača. Pri visokim se frekvencijama energija vibracija uzrokovanih kontaktom kotača i tračnica širi zrakom u obliku zvučnih valova (buke), dok se vibracije nižih frekvencija pronose preko tračnica na donje dijelove konstrukcije. Vibracije i buka uslijed vibracija krutih struktura događaju se u granicama frekvencija 0-100 Hz, dok su frekvencije zrakom pronošenih zvučnih valova u granicama 30-5000 Hz, [9]. Vibracije tla uzrokovane željezničkim prometom ne mogu uzrokovati oštećenja građevina u blizini pruge, no već i male razine vibracija uzrokuju nelagodu kod ljudi.

### 1.3 Mjere za smanjenje buke i vibracija

Četiri su osnovne grupe mjera za smanjenje vibracija od željezničkog prometa: smanjenje vibracija na izvoru, smanjenje rasprostiranja vibracija, zaštita od vibracija na mjestu imisije i ekonomske mjere i regulative. Prva grupa predstavlja primarne (aktivne) mjere, a druge tri su sekundarne (pasivne) mjere zaštite od vibracija. Smanjenje vibracija na izvoru može se postići: odabirom odgovarajućeg tipa konstrukcije gornjeg ustroja, redovitim održavanjem vozne površine tračnica, eliminacijom diskontinuiteta na voznoj površini, odabirom odgovarajućeg tipa vozila te reprofiliranjem kotača vozila, smanjenjem brzine kretanja tračničkih vozila [2]. Pravilno projektiranje i odabir elemenata željezničkog gornjeg ustroja (pričvrsnog pribora, pragova, zastora) važna je mjera za smanjenje širenja vibracija (tablica 1). Optimizacijom elastičnosti tih elemenata, raste njihova sposobnost za prigušenje, upijanje ili raspršenje vibracija generiranih uslijed kontakta kotača i tračnice.

### 1.4 Uloga kolosijeka u ukupnoj razini buke i vibracija

Ukupna razina buke i vibracija sastoji se od komponenti koje emitiraju vozilo i kolosijek. Potrebno je razlučiti ukupnu razinu buke i vibracija koju izaziva vozilo i razinu kojoj je glavni razlog kolosijek. Da bi se udio buke i vibracija od kolosijeka i od vozila mogao razlučiti iz ukupne razine buke i vibracija, uvode se dodatni vibroakustični parametri: hrapavost kotača, hrapavost tračnica, kombinirana hrapavost, stupanj prigušenja kolosijeka, prijenosna funkcija buke kotrljanja, utjecaj razmaka pragova (pinned-pinned frekvencija). Buka i vibracije tračnice pri prometovanju vozila, osim o brzini, znatno ovise o sustavu pričvršćenja, krutosti tračničke podloške te neravnostima vozne površine kotača i tračnice.



**Tablica 1. Smanjenje razine buke i vibracija u ovisnosti o izboru mjere [10]**

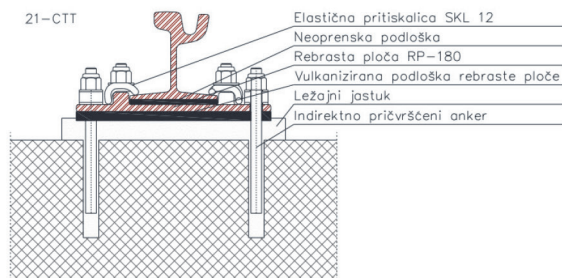
| Mjera smanjenja na izvoru      | Učinak smanjenja buke [dB] | Učinak smanjenja vibracija [dB] |
|--------------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| Elastični pričvrсни pribor     | 3-6                        | 5-10 (20)                       |
| Prigušivači tračnica           | 5-6                        | 7-9                             |
| Zastorni tepih                 | 8-18                       | 10-15                           |
| Elastična podloška ispod praga | 0-3                        | 8-15                            |

Elastični pričvrсни pribor povezuje tračnice s pragovima te prenosi opterećenja vozila s tračnica na donje dijelove konstrukcije gornjeg ustroja. Njegova uloga također je prigušenje vibracija koje se prilikom interakcije vozila i kolosijeka generiraju na njihovom sučelju. Standardni elastičan pričvrсни pribor ima relativno veliku vertikalnu krutost, obično oko 36 MN/m, no za razliku od krutog pričvrsnog pribora osjetno smanjuje vibracije. Specijalni elastični pričvrсни pribor, vertikalne krutosti od približno 5,4 MN/m, omogućuje smanjenje vibracija za 5 do 10 dB pri frekvencijama iznad 30 i 40 Hz, [11]. Svojsvo prigušenja buke i vibracija pričvrsnog pribora moguće je optimizirati pravilnim projektiranjem i modeliranjem elemenata pričvršćenja, vodeći pri tom računa o predviđenom intenzitetu i frekvencijskom karakteru vibracija koje su očekivane na kolosijeku.

Neki od visokoelastičnih pričvrsnih pribora u primjeni su Vanguard, Cologne Egg i Zagreb 21-CTT sustavi. Cologne Egg sustav pričvršćenja radi na principu da je tračnica pričvršćena na ovalnu podlogu preko tijela podloške. Efekt je smanjenje vibracija do 7 dB za frekvencije od 31.5 do 45 Hz i 18 dB za frekvencije 63-80 Hz [12]. U slučaju Vanguard sustava elastičnog pričvršćenja, tračnica je poduprta elastičnim klinovima ili trakama priljubljenima uz vrat tračnice koje omogućuju da nožica tračnice ostane slobodna te nema izravnog kontakta između nožice tračnice i praga. Mala vertikalna krutost elemenata Vanguard sustava omogućava vrlo dobro prigušenje, apsorpciju i smanjenje prijenosa dinamičkih sila (vibracija) s tračnice na podlogu, [13]. Visokoelastični pričvrсни pribori Vanguard i Cologne Egg su vrlo složeni za proizvodnju te su samim tim usprkos kvalitetnim vibroakustičnim svojstvima pogodni samo u specifičnim slučajevima.

Zagreb 21-CTT sustav pričvršćenja (slika 1.) je razvijen na Građevinskom fakultetu Zagreb te je svojim vibroakustičnim svojstvima i jednostavnim procesom proizvodnje i ugradnje kvalitetno rješenje za smanjenje buke i vibracija nastalih tračničkim prometom. Tračnica je oslonjena preko neoprenske podloške debljine 10 mm na čeličnu podložnu ploču. Kod ovog sustava pričvršćenje tračnice je ostvareno T-vijcima i SKL-12 pritiskalicama na podložnu ploču, a sidrenje ploče ostvaruje se neovisno preko zasebnog sidrenog vijka i zasebne elastične podloške posebno projektirane za taj sustav. Čelična podložna ploča se oslanja na ležajni jastuk preko elastične podloš-

ke. Elastična podloška je vulkanizirana na donju stranu čelične podložne ploče i pri ugradnji se uranja u ležajni jastuk koji je napravljen od posebno projektiranog sintetičkog mikrobetona. Uz dodatnu elastičnost, prednost je CTT-a potpuna izolacija sidrenog vijka, tako da ne postoji kontakt čelik-čelik između sidrenog vijka i čelične podložne ploče. Time se smanjuje utjecaj lutajućih struja na čelične komponente kolosijeka [14].



Slika 1. Presjek Zagreb 21-CTT pričvršnog sustava [15]

## 1.5 Potreba za ispitivanjem “DIV” elastičnog pričvršnog pribora

Građevinski fakultet iz Zagreba i DIV d.o.o. kroz program “Povećanje razvoja novih proizvoda i usluga koji proizlaze iz aktivnosti istraživanja i razvoja” provode projekt razvoja novog tipa elastičnog pričvršćenja za željezničke kolosijeke, koji će objediniti jake strane poznatih sustava za pričvršćivanje tračnica te implementirati inovacije u pogledu jednostavne montaže, antivandalske zaštite i poboljšanih svojstava prigušenja buke i vibracija. U procesu razvoja elastične pritiskalice posebna pažnja posvećuje se njenim vibroakustičnim svojstvima. Potrebno je ostvariti optimalne karakteristike vibroakustičnih svojstava razvojem numeričkih modela, te ih dokazati primjenom laboratorijskih i terenskih ispitivanja. U sklopu projekta, nakon razvoja 9 numeričkih modela i odabira 3 najbolja modela, predviđena su opsežna laboratorijska ispitivanja novih tipova pričvršćenja te, konačno, ispitivanje odabranog rješenja na ispitnoj dionici željezničkog kolosijeka tijekom 12 mjeseci. Praćenje vibroakustičnih svojstava pri razvoju pričvršćenja zahtijeva niz standardiziranih i naprednih postupaka ispitivanja koji će biti ovdje prikazani.

## 2 Pregled prethodnih istraživanja

Za određivanje vibroakustičnih svojstava pričvršćenja tračnice potrebno je primarno razumjeti mehanizme nastajanja i širenja buke i vibracija kroz kolosijek. Buka od kotrljanja kotača je najvažniji izvor buke pri prometovanju tračničkih vozila. Nastaje

na kontaktu kotača i tračnice čije međudjelovanje izaziva vibracije. Neravnost kotača i vozne površine tračnica generira vertikalne vibracije kotača i kolosijeka ovisno o njihovim dinamičkim svojstvima. Glavne valne duljine neravnosti, odgovornih za nastajanje buke pri kotrljanju kotača, u rasponu su od 5 do 500 mm. Nastale vibracije se dalje prenose na kotače i na kolosijek čiji elementi služe kao radijatori buke [1]. **Ekperimentalna ispitivanja** vibroakustičnih svojstava željezničkog kolosijeka mogu se podijeliti na laboratorijska i terenska (na ispitnoj dionici kolosijeka tijekom uporabe). Laboratorijska ispitivanja moguće je provoditi u skladu sa standardiziranim metodama za željezničku opremu prema normi za izradbu elastičnog pričvrsnog pribora za prigušenje vibracija (HRN ENV 13481-6/AC:2005 - Oprema za željeznice – Željeznički gornji ustroj – Zahtjevi za izradbu kolosiječnog pričvrsnog pribora – 6. dio: Kolosiječni pričvrсни pribor za prigušenje vibracija [16]), te je moguće odrediti stupanj prigušenja kolosiječne konstrukcije primjenom metode modalnog čekića [17]. Terenska ispitivanja kolosijeka sastoje od mjerenja zvučnog tlaka i ubrzanja određenih dijelova kolosijeka pri prolasku tračničkih vozila (opisano u radnoj uputi [18]). Iz tako prikupljenih podataka moguće je razlučiti ukupnu razinu buke i vibracija koju izaziva prolazak vozila po kolosijeku. Kako bi se osim stupnja prigušenja vibracija odredio točan utjecaj koji u ukupnim razinama buke emitira vozilo, a koji kolosijek, potrebno je mjeriti i hrapavost vozne površine tračnica i kotača. Postoji izravna i neizravna metoda mjerenja hrapavosti.

**Izravna metoda** mjerenja hrapavosti ima nekoliko nedostataka (dugotrajnost, zahtjeva izravan pristup tračnicama, ovisi o pozicioniranju linije mjerenja hrapavosti na voznoj površini tračnice ili kotača u poprečnom smjeru, uređaji za direktno mjerenje hrapavosti kontaktnom metodom koriste ticalo malog radijusa, a ta je hrapavost drugačija od one ostvarene kontaktom kotača i tračnice.

**Indirektna metoda** mjerenja hrapavosti koristi mjerenja vertikalnih vibracija akcelerometrima smještenima ispod nožice tračnice i definirana je tehničkom uputom HRI CEN/TR 16591:2016 [18]. Indirektnim se mjerenjima hrapavosti određuje efektivna hrapavost na izravnom kontaktu kotača i tračnice pri prolasku vozila.

**Kombinirana efektivna hrapavost** kotača i tračnica određuje se indirektno iz tercnih pojaseva spektra prikupljenih vibracija u rasponu od 100 do 5000 Hz mjerenjem razine vibracija  $L_{a,meas}(f_{to})$  prosječnih ubrzanja tijekom prolaska jednog kotača u intervalu  $T_x$ . Iz tog spektra, računa se spektar ubrzanja glave tračnice  $L_{a,head}(f_{to})$ , a poslije i spektar ubrzanja u točki kontakta kotača i tračnice  $L_{a,contact}(f_{to})$ . Ubrzanja se pretvaraju u pomake  $L_{x,contact}(f_{to})$  u točki kontakta. Posljednji je korak konverzija pomaka u kombiniranu efektivnu hrapavost. Navedeni koraci opisani su prema sljedećem izrazu [18]:

$$L_{r,tot}(V/f_{to}) = L_{a,meas}(f_{to}) - A_1(f_{to}) - A_2(f_{to}) - A_4(f_{to}) - 40 \log_{10}(2\pi f_{to})$$

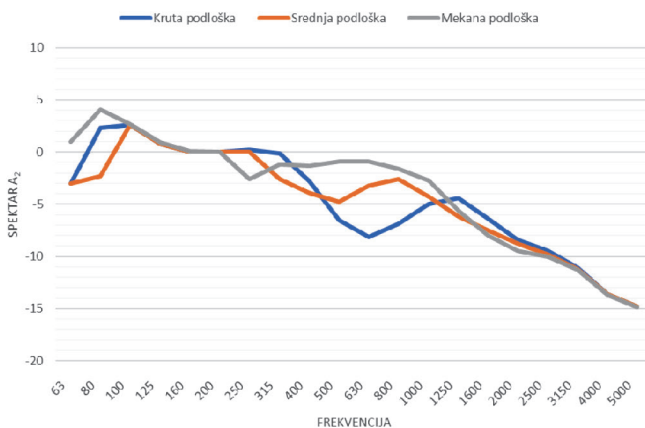
$40\log_{10}(2\pi f_{to})$  konverzija je iz ubrzanja  $L_{a,contact}(f_{to})$  u pomake  $L_{x,contact}(f_{to})$ ;  $f_{to}$  su središnje frekvencije proizvoljnih pojaseva u frekvencijskoj domeni (npr. terčni pojasevi);  $V$  je brzina vozila (m/s),  $L_{r,tot}(V/f_{to})$  frekvencijski spektar kombinirane efektivne hrapavosti vozila i kotača;  $L_{a,meas}(f_{to})$  frekvencijski spektar izmjerenih ekvivalentnih razina vertikalnih ubrzanja tračnice usrednjenih u intervalu prolaska jednog kotača  $T_x$ ,  $A_1(f_{to})$  je razlika razine između usrednjenih ubrzanja u točki mjerenja (ispod nožice tračnice) i na glavi tračnice (jer je akcelerometar nemoguće pri prometovanju vozila postaviti na voznu površinu tračnice):

$$A_1(f_{to}) = L_{a,meas}(f_{to}) - L_{a,head}(f_{to})$$

Razlika razine  $A_2(f_{to})$  između pomaka vibracija u točki kontakta  $L_{x,contact}(f_{to})$  na glavi tračnice i kombinirane efektivne hrapavosti  $L_{r,tot}(f_{to})$  koja opisuje do koje mjere hrapavost izaziva vibracije tračnice kao posljedicu međudjelovanja kotača i tračnica.

$$A_2 = L_{x,contact}(f_{to}) - L_{r,tot}(f_{to})$$

Svojstvo koje najviše utječe na parametar  $A_2$  jest krutost tračničke podloške. Prema normi CEN 13146-9 [19] moguće je mjeriti niskofrekvencijsku dinamičku krutost tračničke podloške. Varijacije parametra  $A_2$  za terčne pojaseve od 63 do 5000 Hz za različite krutosti tračničke podloške prikazuje slika 2.



Slika 2. Utjecaj krutosti podloške na  $A_2$

**Ugradnja elastičnih podloški** između nožice tračnice i praga je jedna od mjera za smanjenje niskofrekvencijskih vibracija. Što su veća elastična svojstva materijala od kojeg je podloška izrađena, to je veće i prigušenje vibracija. Debljina podloški ne bi

trebala biti veća od 10 mm kako bi se izbjegle deformacije tračnice uslijed vlastite težine.

$A_4(f_{to})$  je razlika razine vibracija u točki dodira i razini prosječnih vibracija u intervalu prolaska kotača:

$$A_4(f_{to}) = L_{a,head}(f_{to}) - L_{a,contact}(f_{to})$$

Spektar konverzije  $A_4(f_{to})$  predstavlja razliku razine između vibracija u točki kontakta  $L_{a,contact}(f_{to})$  i prosječne razine vibracija prolaska kotača  $L_{a,head}(f_{to})$  te ovisi o stupnju prigušenja vibracija kolosijeka, odnosno prigušenju prostornih vibracija koje se izražava u dB/m.

**Stupanj prigušenja kolosijeka** je jedno od ključnih svojstava pri određivanju utjecaja kolosijeka u ukupnoj razini buke i vibracija od tračničkog prometa kojim se opisuje koliko je vibracija kolosijek u stanju apsorbirati, tj. koliko daleko vibracije putuju tračnicom od izvora pobude prije nego budu prigušene. Što je dulja dionica tračnice koja vibrira, emitira se više buke pri prolasku vozila [9]. Kolosijek s većim stupnjem prigušenja vibracija tijekom prolaska vozila apsorbirat će veću energiju vibracija i prenositi manje vibracija na okolno tlo te manje buke u okoliš. Prigušenje vibracija kolosijeka, iako mnogo značajnije od prigušenja kotača, ne utječe mnogo na frekvencijski odaziv konstrukcije, čije su vibracije u rasponu frekvencija iznad 500 - 1000 Hz, kada se vibracije šire tračnicom. Prigušenje vibracija ima dva izvora, a to su: gubici energije vibracija na elastičnim sustavima pričvršćenja (tračničke podloške, prigušivači vibracija i sl.) te gubici energije prenesene na pragove i okolno tlo koji također utječu na ukupno prigušenje vibracija tračnice [1]. Normom HRN EN ISO 3095:2013 [4] određena je donja granična krivulja za horizontalni i vertikalni stupanj prigušenja vibracija, koji kolosijek mora zadovoljavati kako bi bio pogodan za provođenje tipskih mjerenja buke pri prolasku željezničkih vozila. Detaljni postupak metoda određivanja stupnja prigušenja kolosijeka obrađen je u doktorskom radu (Haladin 2016) [15].

Određivanje prijenosne funkcije buke i vibracija nastalih kotrljanjem vozila po tračnicama

Ako je buka kotrljanja jedini značajan izvor tijekom prolaska vozila (uz odsutnost aerodinamičke buke ili udarnih zvukovnih izvora), tada se ukupna prijenosna funkcija buke kotrljanja određuje iz ekvivalentne razine buke i kombinirane hrapavosti pri brzini  $v$ :

$$L_{HpRtot,ni}(f_c) = L_{eq,tp}(f_c) - L_{Rtot}(f_c, v) - 10 \log(N_{ax} / I)$$

Ukupna prijenosna funkcija  $L_{HpR,TOT,ni}(f_c)$  je neovisna o hrapavosti, duljini vozila i broju osi. Ona karakterizira vibroakustična svojstva vozila, kolosijeka i načine širenja

buke i vibracija. Prijenosna funkcija može biti definirana u skladu sa zvučnom snagom za definiranu duljinu kolosijeka ili vozila i normalizirana prema broju osovina:

$$L_{HWR_{tot}}(f_c) = L_W(f_c) - L_{R_{tot}}(f_c, v) - 10 \log(N_{ax})$$

$L_W(f_c)$  je razina zvuka nastala prolaskom vozila (ovisna o duljini). Ako je prijenosna funkcija određena kroz nekoliko mjerenja, srednje vrijednosti se računaju aritmetički. Ukupna prijenosna funkcija može biti razdvojena na komponentu uzrokovanu vozilom i na komponentu uzrokovanu kolosijekom pomoću metoda baziranih na proračunu, referentnim vozilima ili kolosijecima, i stacionarno recipročnim mjerenjima. Također je moguće odvojiti buku kotrljanja od ostalih izvora buke, primjerice aerodinamičnu buku od buke kotrljanja ili buku vozila od buke kotrljanja [18].

Utjecaj razmaka pragova na širenje buke i vibracija

Razmak pragova kolosijeka utječe na emisiju buke i vibracija koje se šire tračničkim prometom. "Pinned-pinned" frekvencije korespondiraju s valovima čije su nultočke smještene na mjestima podupiranja pragova. Prve dvije "pinned-pinned" frekvencije nalaze se približno oko 950 i 2200Hz (za tračnicu UIC60 i udaljenost pragova od 0.6 m). Za smanjenje vibracija u rasponu između pragova, moguće je koristiti prigušivače uz vrat tračnice koji ostvaruju prigušenje veće od 5 dB/m za određene frekvencijske pojaseve [20].

Za optimalan razvoj elastične "DIV" pritiskalice potrebna su uz određivanja hrpavosti i stupnja prigušenja kolosijeka, dodatna istraživanja vezana za krutost tračničke podloške, prijenosne funkcije, utjecaj razmaka pragova na širenje buke i vibracija, i kvalitetniju separaciju pojedinih izvora buke i vibracija.

### 3 Utjecaj tri tipa pričvršćenja na razinu buke i prigušenja vibracija - Savska ulica u Zagrebu

#### 3.1 Sustavi pričvršćenja na ispitnoj dionici u Savskoj cesti

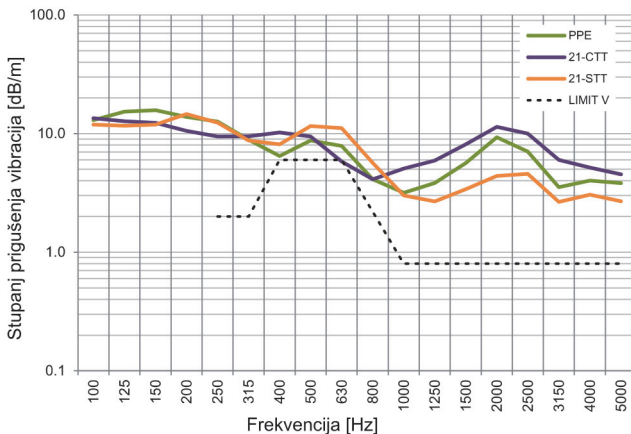
Dionica tramvajskog kolosijeka u Savskoj na kojoj se mjerenje izvršilo podijeljena je u tri poddionice. Prvi dio je referentan te je na tome dijelu primijenjen PPE sustav pričvršćenja kao uobičajeni na području grada Zagreba. Na drugome dijelu primijenjen je sustav pričvršćenja Zagreb 21-CTT, a na trećem dijelu je izveden sustav pričvršćenja naziva Zagreb 21-STT. PPE je skraćeni naziv za "pričvrсни pribor povećane elastičnosti". Prema tom sustavu tračnica se oslanja na pojedinačne ležajeve koji se nalaze na betonskoj podlozi. CTT je skraćeni naziv za "Classic Tram Track" i njegove osnovne karakteristike su prikazane u uvodu. STT je skraćeni naziv za "Slab Tram Track", koji predstavlja novi sustav za tramvajske kolosijeke u Hrvatskoj čiju osnovu čine dvodijelni betonski pragovi na koje se tračnica oslanja preko elastične podloške.

### 3.2 Postupak ispitivanja kolosijeka

Na ispitnoj dionici određivan je stupanj prigušenja vibracija primjenom metode prolaska tračničkih vozila. Mjerenjima buke (razina zvučnog tlaka) na ispitnoj dionici, mogao se odrediti utjecaj stupnja prigušenja vibracija na konačne razine buke emitirane u okoliš. Analiza provedena na ispitnoj dionici na Savskoj cesti u kontroliranim uvjetima (tramvaj TMK2266, brzina 30 km/h, mjerenja u noćnim satima zbog smanjivanja utjecaja okolne buke), pokazala je kako visok stupanj prigušenja vibracija pridonosi smanjivanju razina buke pri prolasku tramvajskih vozila [15].

### 3.3 Rezultati ispitivanja tri tipa sustava pričvršćenja u Savskoj ulici

Stupanj prigušenja kolosijeka za niže frekvencijske pojaseve sličan je za sva tri tipa pričvršnog kolosiječnog pribora (slika 3.).



Slika 3. Stupanj prigušenja kolosijeka u vertikalnom smjeru za 3 tipa pričvršnog pribora [21]

Za frekvencijski pojas od 1000 Hz do 5000 Hz najučinkovitije smanjenje buke i vibracija je u primjeni 21-CTT pričvršnog sustava. 21-STT pričvršni sustav ima najmanje vrijednosti stupnja prigušenja vibracija zbog vlastite konstrukcije koja sadrži samo jednu elastičnu tračničku podlošku i općenito je to sustav veće krutosti od sustava pričvršćenja 21-CTT. Prema tablici 2 vidljivo je da isto referentno vozilo prolazeći konstantnom brzinom od 30 km/h emitira drugačije razine buke za razne tipove pričvršćenja. Niže vrijednosti buke su zabilježene na dijelu kolosijeka koji ima 21-CTT pričvršćenje, što je u korelaciji s podacima o najvišem stupnju prigušenja koje taj tip pričvršćenja ima.

Tablica 2. Ekvivalentna razina buke pri prolasku tramvajskog vozila TMK 2266 ( $v = 30 \text{ km/h}$ ) [21]

| Tip pričvršćenja | $L_{pAeq,Tp}$<br>[dB] | SD  |
|------------------|-----------------------|-----|
| PPE              | 84.5                  | 0.3 |
| 21-CTT           | 80.9                  | 1.4 |
| 21-STT           | 82.9                  | 0.8 |

## 4 Zaključak

Smanjenje emisije buke i vibracija u urbanim područjima uvelike utječe na razinu ugodnosti i zdravstvene sigurnosti okolnog stanovništva, a također i na odabir željezničkog prometa kao oblika prijevoza. Cilj je ovog rada predstavljanje niza metoda koje pomažu u optimizaciji vibroakustičnih svojstava kolosijeka, u prvom redu elastičnih sustava pričvršćenja. Do važnih podataka o kolosijeku se dolazi pomoću metoda modeliranja ili eksperimentalnih metoda mjerenja vibroakustičnih svojstava. Za detaljnu karakterizaciju buke i vibracija koje emitira željezničko vozilo pri prolasku kolosijekom, potrebno je primijeniti napredne metode separacije, na temelju određenog stupnja prigušenja vibracija, indirektno hrapavosti tračnica te prijenosne funkcije na kontaktu kotača i tračnice. Na primjeru kolosijeka u Savskoj cesti vidljivo je kako je stupanj prigušenja vibracija jedno od najvažnijih vibroakustičnih svojstava kolosijeka te je u korelaciji s izmjerenim razinama buke pri prometovanju tramvajskog vozila kolosijekom. Primjenom navedenih metoda bit će moguće optimizirati vibroakustična svojstva nove elastične pritiskalice koja se razvija u sklopu zajedničkog projekta DIV d.o.o. i Građevinskog fakulteta.

## Literatura

- [1] Thompson, D.: *Railway Noise and Vibrations*. Elsevier Ltd, 2009.
- [2] Ahac, M., Lakušić, S.: Vibracije od željezničkog prometa, *Dani prometnica 2009, Gospodarenje prometnom infrastrukturom*
- [3] COMMISSION REGULATION (EU) No 1304/2014 of 26 November 2014 on the technical specification for interoperability relating to the subsystem 'rolling stock — noise', *Official Journal of the European Union*. p. 17, 2014.
- [4] HRN EN ISO 3095:2013 *Akustika – Oprema za željeznice – Mjerenje buke koju proizvode željeznička vozila* (ISO 3095:2013; EN ISO 3095:2013), 2013.
- [5] HRN EN 15610:2009 *Oprema za željeznice - Emisija buke - Mjerenje hrapavosti tračnica povezane sa stvaranjem buke pri vožnji željezničkih vozila*, 2009.



- [6] HRN EN 15461:2011 *Oprema za željeznice - Emisija buke - Određivanje dinamičkih svojstava za dionicu pruge kojom prolazi vlak pri mjerenju buke* (HRN EN 15461:2008+A1:2010), 2011.
- [7] Haladin, I., Lakušić S., Koščak J.: Mjerenje stupnja prigušenja vibracija na klasičnim kolosiječnim konstrukcijama *GRAĐEVINAR* **68** (2016) 6, 461-476
- [8] Jovanović, S., Božović, D., Tomičić-Torlaković, M.: Railway infrastructure maintenance planning based on condition measurements and analysis, *GRADEVINAR*, **66** (2014) 4, pp. 347- 358, <http://dx.doi.org/10.14256/JCE.959.2013>.
- [9] Esveld, C.: *Modern railway track*, Second edi. Delft: TU Delft, 2001
- [10] Lakušić S., Ahac M.: Rail traffic noise and vibration mitigation measures in urban areas
- [11] *Transit noise and vibration impact assessment*, Federal Transit Administration (FTA), 2006.
- [12] Zwolski, J.: *Railway track elements*, PhD CE, Wroclaw University of Technology
- [13] Lakušić, S., Ahac, M.: Mjere za smanjenje buke i vibracija od željezničkog prometa, *SABOR HRVATSKIH GRADITELJA 2008*, (ur. Simović, V.), Cavtat, Hrvatska, pp. 383-395, 06-08. studeni 2008.
- [14] Haladin, I., Lakušić S., Koščak J.: Izvještaj o monitoringu sustava pričvršćenja tramvajskog kolosijeka "Zagreb 21-CTT" i "Zagreb 21-STT" na Savskoj cesti u Zagrebu
- [15] Haladin, I.: *Ocjena stupnja prigušenja vibracija tramvajskih kolosijeka primjenom metode prolaska tračničkih vozila*, doktorski rad 2016, Sveučilište u Zagrebu
- [16] HRN ENV 13481-6/AC:2005; *Oprema za željeznice – Željeznički gornji ustroj – Zahtjevi za izradbu kolosječnog pričvrstnog pribora – 6. dio: Kolosiječni pričvrstni pribor za prigušenje vibracija* (ENV 13481-6:2002/AC:2004
- [17] Venghaus H, Thompson DJ, Toward M, Bumke D, Kitson P, Asmussen B, et al. Assessment of the efficiency of rail dampers using laboratory methods within the STARDAMP project. 38th Ger Annu Conf Acoust. 2012;22.
- [18] HRI CEN/TR 16591:2016; *Željeznički sustavi-Akustika-Metoda mjerenja za kombiniranu hrapavost, stupnjeve dotrajalosti željezničkog gornjeg ustroja i prijenosne funkcije*
- [19] HRN EN 13146-9:2012; *Željeznički sustavi-Željeznički gornji ustroj-Metode ispitivanja za kolosiječni pričvrstni pribor-9.dio: Određivanje krutosti* (EN 13146-9:2009+A1:2011)
- [20] Maes, J., Sol, H.: A double tuned rail damper—increased damping at the two first pinned—pinned frequencies, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 267, no. 3, pp. 721–737, 2003, [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00736-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00736-3).
- [21] Lakušić, S., Haladin, I., Ahac, M.: *The Effect of Rail Fastening System Modifications on Tram Traffic Noise and Vibration*, Hindawi Publishing Corporation, Shock and Vibration; Volume 2016, Article ID 4671302, 15 pages

# Modelska standardizacija građevinske ponude metodom dinamičkog strukturnog programiranja

Mr.sc. **Vladimir Križaić**, prof.dr.sc. **Ivica Završki**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Međimursko veleučilište Čakovec, vladimir.krizaic@gmail.com

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, zavrski@grad.hr

## Sažetak

Informatizacijom izrade građevinske ponude izravnim prijenosom tablica iz postojećih normativa u one računalne nastavljen je problem preciznosti kalkulacije te je uočena poteškoća u povezivanju stavaka s normativima. Povezivanjem strukturnoga programiranja s dinamičkim programiranjem, poznatim iz operacijskih istraživanja, kreirana je metoda dinamičkoga strukturnog programiranja (DSP). Ona s modelskim normativima povećava preciznost u izradi kalkulacije i ponude te standardizira građevinsku organizacijsku komponentu.

*Ključne riječi: softver-binarna strukture, modelska standardizacija ponude, vektorska normizacija, dinamičko strukturno programiranje (DSP)*

## Construction bid model standardization through dynamic structures programming method

### Abstract

The use of IT in making bids in the building industry via a mere load of norm data into software continued the problem of a lack of calculation preciseness and the difficulty in relating expense list items to the resource norms arose. Teaming the structural and the dynamic programming known from the operational research created the dynamic structural programming method (DSP). It uses model norms to increase the preciseness of calculations and bids and standardizes the organizational building industry component.

*Key words: software-binary structures, model standardization bids, vector standardization, dynamic structural programming (DSP)*

## 1 Uvod

S razvojem treće industrijske revolucije krajem prošloga stoljeća u RH, tada veliko i razvojno usmjereno poduzeće *Građevinski kombinat Međimurje* pristupilo je procesu informatizacije, i to u prvoj fazi računovodstva. Zatim je isprogramirana marketinška funkcija, a naposljetku pristupilo se informatizaciji građevinske proizvodnje. U tome se trenutku mislilo da je za razvoj svih navedenih procesa neophodna digitalizacija normativa radova. Digitalizaciji se pristupilo tako da su se podaci iz knjiga građevinskih normi [1, 2] izravno prenosili u slogovni računalni zapis. To je bio postupak velikih razmjera u kojemu se godinu dana radilo na prijepisu, a zatim se nekoliko sljedećih godina radilo na programiranju proizvodnoga i upravljačkoga sustava. Prvotno se programiralo u simboličkim jezicima *Cobolu* i *Fortranu*, a potom se, s pojavom jake relacijske baze Oracle i dizajnirane razvojne alatne tehnologije, programiralo u jezicima SQL te PL-SQL te se razvijala aplikacija Maris s modulima za pokrivanje svih područja poslovanja. Međutim, opisani koncept u svojoj biti nije promijenio pristup definiranju normi, a posljedično ni proces izrade ponude.

Danas sve znanstvene grane, pa i one organizacijske, proizvodne procese žele funkcijski povezati, modelirati te standardizirati [3]. Modelskom standardizacijom poslovnih procesa uklanjaju se problemi te nastoje optimizirati ekonomski i organizacijski elementi u poslovnome sustavu ili u njegovu dijelu. Taj proces približavanja organizacijskih rješenja tehnološkim dostignućima, kako bi se ukinuo njihov jaz, rezultira izradom modela sa *cyber*-fizičko-proizvodnim sustavom [4]. Kompanije, osobito one velike, konkurentne i globalne, već su za svoje potrebe stvorile vlastite standardne modele podataka i poslovnih pravila poput Inženjering-sustava temeljenog na modelima (engl. *Model Based Systems Engineering* – MBSE) [5].

Također, u cilju racionalizacije poslovanja i unaprjeđenja učinkovitosti graditeljstvu su na raspolaganju brojne metode, tehnike i prakse. Potrebno je spomenuti primjenu BIM-a [6] te Porterovoga modela [7], čija je svrha racionalizacija troškova i optimizacija cijene proizvoda, skupa metoda operacijskih istraživanja koje se bave pronalaženjem maksimuma ili minimuma funkcije cilja te metode masovnoga opsluživanja i asignaciju resursa [8].

Metoda dinamičkoga strukturnog programiranja [9] najbliža je algebarskim modelima koji se mogu definirati kao interakcijski strukturni modeli. Kompozicijom tih modela razvija se nova metoda dinamičkoga strukturnog programiranja (DSP) koja strukturno obrazlaže svaku troškovničku stavku, proizvod odnosno građevinsku ponudu.

U ovome se radu za grafički dizajn prikaza primjene DSP metode u izradi građevinske ponude koristi softver MindManager [10], na temelju čije je grafike vidljiva globalna struktura procesa. To, međutim, nije dovoljno, nego je težište potrebno proširiti na sustavne modelske jedinice koje se dedukcijom rastavljaju na komponente normi, stavaka, troškovnika i ponuda.

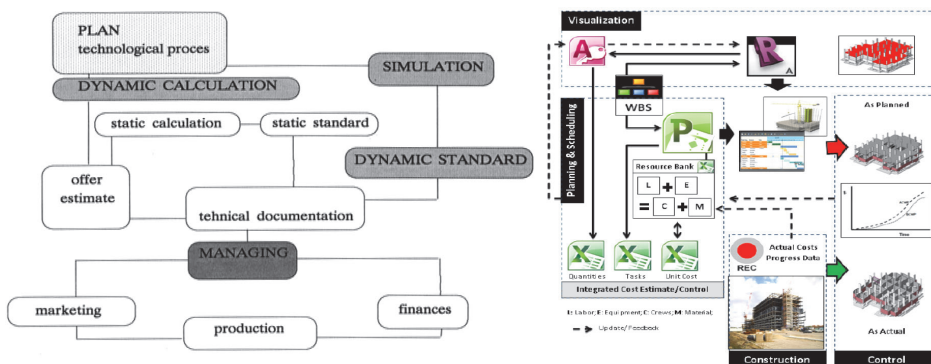
U ovome radu predložen je pristup modelskoj standardizaciji normativa vezanih uz stavke troškovnika na unificiran i modularan način s vezom na BIM komponente arhitektonskih i konstruktorskih modula u svim fazama projekta, i to od koncipiranja preko definiranja i provedbe do održavanja. Primjena DSP metode omogućuje cyber-fizikalno prikazivanje procesa, identifikaciju optimalne količine resursa za svaku troškovničku stavku te u konačnici izradu najpovoljnije ponude.

## 2 Stanje i metode modelske standardizacije

Modelska standardizacija u graditeljstvu odnosi se na standardizaciju u projektnome, tehnološkome, upravljačkome i kontrolnome smislu. U projektiranju postoji osnovni modularni sustav  $1M = 10\text{ cm}$ , odnosno  $6M$ , kao jedan od najčešće primjenjivanih modula. Informatičke softverske i CAD kuće pak modeliraju i programiraju BIM sustave. Također, u tehnološkome smislu poduzeća rade na standardizaciji i tipizaciji građevinske tehnologije i proizvoda preko inženjersko-modularnih sustava te na uvođenju 3D printera i ostalih brojnih elemenata automatizacije i robotizacije u proizvodnju. U upravljačkome smislu težište je na razvoju i primjeni softvera za integrirano poslovanje, na uvođenju i primjeni sustava upravljanja rizicima te na traženju optimuma u cjelokupnome poslovanju.

Kod standardizacije praćenja gradilišta te upravljanja projektima i poslovnim sustavima često se primjenjuje ISO standard, no on se odnosi samo na standardizaciju zapisa i distribucije podataka, a to omogućuje već i dobra priprema rada ozbiljnoga građevinskog poduzeća koje u sklopu pripreme izrađuje projekte organizacije građenja (POG). Informatizacija izrade POG-a i upravljanja poslovnim građevinskim sustavima danas se udomačila u većini poduzeća. Zapis građevinske ponude radi se prijenosom troškovnika iz projektne dokumentacije u *excel* datoteku ili se već dobiva u takvome obliku. U naprednijim građevinskim poduzećima u građevinsku ponudu unose se podaci automatski generirani iz BIM sustava. Pridruživanjem normativa svakoj troškovničkoj stavci provodi se glavni proces definiranja ponude za neki projekt. Dodaju se statičke diskretne vrijednosti iz tablica građevinskih normi, no one većinom zaostaju za suvremenom tehnologijom, što dovodi do rizičnog planiranja i provedbe te do općenito rizičnog poslovanja u građevinskim poduzećima. Informatizacijom poslovnoga sustava na prethodni način nije postignuto njegovo bitno unaprjeđenje te se nije dobilo na preciznosti u izračunu količina i troškova pa je u tome pogledu početno oduševljenje računalima nestalo. No, informacijska tehnologija i dalje se razvija neviđenom brzinom i sve teži prema modeliranju procesa BIM sustavima, odnosno dinamičkim ili automatskim prijenosom konstruktivnih jedinica mjera prema ponudbenoj dokumentaciji, te 3D prikazima u koncipiranju, definiranju, izvođenju, stručnome nadzoru te održavanju građevina.

Implementacija integriranih informatičkih sustava donosi veliku prednost u komunikaciji i racionalizaciji projekta u pogledu vremena, kvalitete i troškova, no u praksi se pokazalo to da još uvijek postoji veliki kalkulacijski faktor jer se operacije i postupci definiraju pregrubo. Postoje statička odnosno diskretna norma i troškovnik, a proizvodnja je dinamična odnosno varijabilna i funkcijski povezana. Dakle, teorija i praksa nisu usklađene, što dovodi do izostanka ispravnih činjenica. Dosadašnje BIM tehnologije rade se na makroprincipu, a na mikroplanu treba stvoriti nove modele. U skladu s time vektorski modeli normi u tehnologiji i organizaciji donose preciznije podatke, što je ekvivalentnije projektnim varijabilnim zahtjevima. I dinamički model projekta organizacije ima težinu u odnosu na statički model, no simulacije su se počele uvoditi u tehnologiju konstrukcije tek na mala vrata, a građevinska organizacija još uvijek zaostaje u njihovoj primjeni. Modelska standardizacija klasičnoga modela POG-a prvo se dotakla potrebe za brzim definiranjem ponuda. Svojstva staroga sustava normativa jesu linearnost, diskretnost i nestandardnost opisa procesa normativa i troškovnika. Njihova struktura definira 1:M odnos aktivnosti i resursa, odnosno opis rada i vrijednosti. Takav pristup zahtijeva velike kapacitete arhiviranja i velike baze podataka. Izrada softvera za izradu ponude kao djela POG-a prijenosom praktičnoga diskretnog operativnog načina na računalo pokazala se premalim doprinosom računalne tehnologije u toj domeni. Zastarjelost i neažurnost normativa udaljava od realnosti pa zbog brzoga razvoja tehnologije postoji organizacijski zaostatak. Zato se stvara potreba za dinamičkim modeliranjem građevinskoga projekta organizacije građenja [11, 12] (slika 1).



Slika 1. Statički te dinamički POG [12] i BIM [13]

Cilj je istraživanja zamjena statičkih podataka projekta organizacije građenja dinamičkim podacima nastalima dinamičkim programiranjem zapisa rekurentne jednadžbe, odnosno prikazati na koji način dinamički podatak ubrzava sve faze izrade i ažuriranja projekta organizacije građenja, što znači da je cilj istraživanja prikazati

mogućnosti ubrzanja izrade i ažuriranja građevinske ponude kao osnovne podloge u građevinskome investicijskom ciklusu, povećanje preciznosti definiranja veličina investicija te podizanje kvalitete građevinskoga proizvoda modelskim standardiziranjem građevinskog procesa.

### 3 Dinamičko strukturno programiranje – dosadašnje istraživanje

Dinamičko programiranje iz operacijskih istraživanja kao mlade grane znanosti omogućuje optimalno upravljanje u smislu postizanja maksimuma ili minimuma danoga procesa zapisom rekurentne jednadžbe (1).

$$\mathbf{fn}(p)_j = \mathbf{G}(p) + \mathbf{fn} - 1(p)_{j,k} \quad (1)$$

Višeetapni procesi definirani su vektorskim stanjima kroz rekurentne jednadžbe. Zapis definira stanje procesa  $\mathbf{fn}(p)_j$  u odnosu na početnu razinu  $\mathbf{G}(p)$  i prethodno stanje procesa  $\mathbf{fn} - 1(p)_{j,k}$ . Tako su svi procesi funkcijski povezani, no pogodni za jednostavne i unificirane sustave.

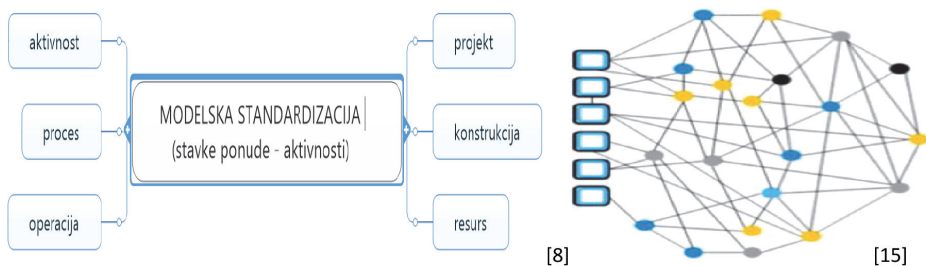
Moderno strukturno, odnosno strukturirano, a potom objektno programiranje ima korijen u drvetu logičnih mogućnosti. Tako programski jezik *Pascal* spada u strukturirane jezike, a *Delphi* u objektne jezike. Strukturno programiranje sa svojim konstrukcijama omogućuje programeru to da uvede određeni red (razinu) u sam program i lakše komunicira tijekom programiranja. Tako se napušta proceduralno programiranje i težište se stavlja na objekt odnosno na strukturu koja sadrži ili obrađuje podatak.

Povezivanjem strukture podataka u logičkome drvetu mogućnosti s razinama, odnosno nivoima, te stavljanjem jednadžbe dinamičkoga programiranja u strukturu logičkoga drveta nastaje metoda dinamičko-strukturnog programiranja. Ona pogoduje razradi raznovrsnih procesa, ali s određenom formom nastaje preduvjet standardizacije procesa.

#### 3.1 DSP metoda građevinske ponude

U svim tehnološkim djelatnostima definiranju proizvodnje i proizvoda pristupa se korištenjem troškovnika. Kalkuliranjem stavki definira se vrijednost proizvoda, odnosno građevinska ponuda koja je funkcija normativa i cijene resursa iz normativa. Po uzoru na programerske sintakse, pogotovo najjednostavnije sintakse Pascal [14], definira se unificiran način zapisa teksta stavaka ponude (slika 2). Formira se zapis po razinama i raspodjeli od složenoga procesa do postupka, a kombinatorikom i povezivanjem tih zapisa modelira se zapis proizvodnje koji je danas popularno nazvan *cyber*-sustav. U softverskome paketu zapis se dijeli do 15 razina, a zapisuju se

svi procesni modeli organizacije građenja. Pojedina razina ima samo nekoliko slogova, a najveći par tisuću slogova, što i nekadašnjoj računalnoj tehnologiji nije bio nikakav problem. Model aktivnosti, odnosno opisa stavaka, definira konstrukciju na razini procesa, ali i operacijske organizacijske razine u funkciji resursa. Sortiranjem baze opisa aktivnosti odnosno ponuda *Građevnog kombinata Međimurje* utvrđeno je oko 5000 različitih riječi te oko 3000 resursa. Povoljnim povezivanjem danih struktura modularnim i varijantnim sastavnicama s malo baze mogu se simulirati svi praktični procesi i operacije do postupka.



Slika 2. Standardizacija aktivnosti – elementa opisa - stavaka ponude

Variranjem i kombiniranjem standardnih modula grade se zapisi gotovo jednaki operativnim zahvatima, ali s diferencijalnim veličinama dimenzija konstrukcija i dimenzija resursa proizvodnje. To se postiže  $M : M$  odnosom resursa i aktivnosti, odnosno relacijskim modeliranjem baze podataka [15, 16]. Zato je pretpostavka da se kompozicijom dinamičkoga programiranja i modernim strukturnim programiranjem te standardiziranjem elemenata građevinske ponude uklanja problematika POG-a te da se DSP metoda i sama ponuda mogu matematički definirati jednadžbom (2,3).

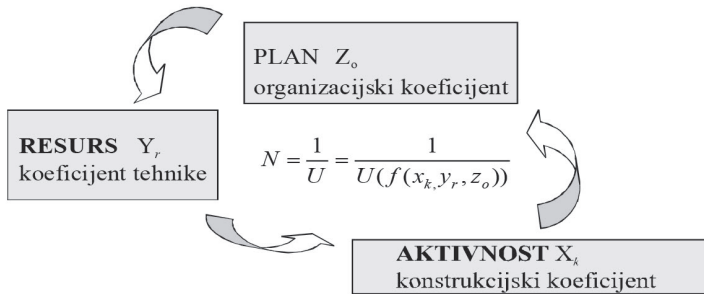
$$\text{Dinamičko strukturno programiranje} = \text{DSP metoda} = \mathbf{U}[\mathbf{f}_n(\mathbf{S}_{i,j,k}) = \mathbf{f}_{n+1}(\mathbf{S}_{i+1,1+1,k+1})] \quad (2)$$

$$\text{Građevinska ponuda} = \text{GP} = \mathbf{U}[\mathbf{f}_n(\mathbf{T}_n, \mathbf{O}_n) = \mathbf{f}_{n+1}(\mathbf{T}_{n+1}, \mathbf{O}_{n+1})] \quad (3)$$

Ovim zapisom građevinska ponuda dobiva vektorska strukturna stanja  $\mathbf{f}_n(\mathbf{S}_{i,j,k})$ , gdje je novo stanje  $\mathbf{f}_n(\mathbf{T}_n, \mathbf{O}_n)$  razine  $n$  u funkciji svih prethodnih stanja  $\mathbf{f}_{n+1}(\mathbf{T}_{n+1}, \mathbf{O}_{n+1})$  razine  $n+1$ . U skladu s time neophodna je nova definicija standardizacije građevinske ponude i svih njezinih sastavnih komponenti kako bi se elementi  $\mathbf{T}_n, \mathbf{O}_n$  (tehnologije, organizacije) mogli funkcijski povezati. Testiranja će biti provedena na projektu provedenome u praksi kako bi se kroz tehnologiju Min Jet usporedili sadašnjost i budućnost građevinske ponude i proizvodnje.

### 3.1.1 Analitika strukture norme

Daljnijim algebarskim i funkcijskim razbijanjem strukture  $T_n, O_n$  stvara se nova struktura normativa kao temelj novoga modeliranja jer sadašnja je sastavnica stavki ponude i komponenti resursa u normativu diskretnoga modela. Nemogućnost ispisa svih radova i aktivnosti te nefleksibilnost statičkoga zapisa stvara promjenu u strukturi i tijeku definiranja normativa, na temelju čega je nastao ciklični trodimenzionalni model standardizacije temeljnoga elementa POG-a (slika 3).



Slika 3. Trodimenzijski MSN

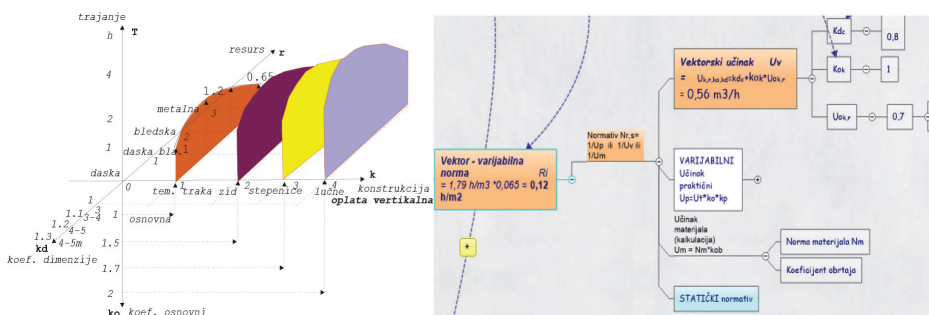
Teorijom sustava istražuju se veze između sustava i podsustava pa se kreiranjem normativa prema zanimanjima radnika optimizira tekst norme, odnosno opis rada stavke ponude. S razvojem funkcijskoga i strukturnoga modela sastavnica po uzoru na dinamičko programiranje stvara se softversko-algebarska procedura [17, 18]. Računala su pogodna za te višedimenzijske vektorske procese te računalno-matrično-vektorske kombinacije donose rezultate do kojih se dosadašnjom organizacijom nije moglo doći. Analitikom modela trodimenzionalne standardizacije dobiva se model s tri varijable za definiranje učinka resursa, odnosno normativa jednadžbi (4) kao recipročne vrijednosti.

$$N = 1/U = 1/U(f(x_k, y_r, z_o)) \quad (4)$$

Iz modela plana dobivaju se varijabla  $z_o$ , koja je karakteristika organizacije vidljiva iz sheme gradilišta projekta, te varijabla  $x_k$  kao karakteristika konstrukcije definirane u tehničkoj dokumentaciji odnosno troškovniku. Model resursa daje varijablu  $y_r$ , odnosno dimenziju karakteristike tehnike, odnosno resursa za proizvodnju. Takav zapis omogućuje zapis svih opisa normativa danom sintaksom modelske standardizacije normativa (MSN) i vektorskoga normativa (VN) koji se stvara iz mase diskretnih vrijednosti raznih normi uz pomoć Gaussove metode najmanjih kvadrata. Daljnjim modeliranjem dobiva se funkcijska povezanost resursa i vremena norme u odnosu



na dimenziju konstrukcije ili rada. Kod konstruktivnih elemenata utrošci materijala iskazuju se povezivanjem konstruktorskih jednažbi na učinke resursa svedenih na dimenzije projektne dokumentacije [19]. Standardiziranjem ponude otvara se novo područje modeliranja vektorskoga normativa [20] (slika 4) kao osnove za dinamičko kalkuliranje ponude i planiranje projekata.



Slika 4. Vektorski normativ (vertikalne optate, ponude DSP metodom)

Funkcijskim povezivanjem normativa početne jedinice sustava kalkuliranja i proizvodnje stvara se osnova za jednažbe cijeloga sustava pa i podsustava građevinske ponude.

## 4 Zaključak

Dosadašnji rezultati DSP metode s vektorskim normama uz primjenu softvera Mind Jet pokazuju preciznije definiranje građevinske ponude te posljedično modelskom standardizacijom definiranje kvalitetnijega građevinskog proizvoda. Učinkovitost statističke distribucije za definiranje vektorskih normativa neće se moći ostvariti svugdje pa će dijelom ostati i stara, diskretna vrijednost sastavnice norme. Namjera je u građevinarstvu modeliranje provedbe projekta „točno na vrijeme“ te reguliranje sustava proizvodnje i čitavoga poslovnog sustava na način koji omogućuje dnevno praćenje i kontrolu projekta, odnosno „svakodnevno praćenje“. DSP metoda nadograđivanjem kibernetским i kombinatornim pristupom [21, 22] može doprinijeti racionalizaciji građevinske proizvodnje te se preporuča pokretanje novih istraživanja za identifikaciju i definiranje modela standardizacije tehnologije i organizacije. Dosadašnji rezultati vektorskoga modeliranja tehnologije i organizacije [23] osnova su za primjenu tehnologija četvrte industrijske revolucije koja u ovome stoljeću otvara nove mogućnosti u komunikaciji i upravljanju građevinskim i ostalim sustavima. Razvoj tih modela zahtijeva dug i neprekidan rad te suradnju znanosti i gospodarstva. Očekuje se to da modelska standardizacija zaživi u znanosti i gospodarstvu radi postizanja produktivnosti i ekonomičnosti građevinskih proizvodnih procesa te smanjenja jaza između tehnologije i organizacije.

## Literatura

- [1] Normativi i standardi rada u građevinarstvu, IRO- Građevinska knjiga Beograd, 1981
- [2] Gradbene norme GIPOSS: GNG., GIPOSS, 1979
- [3] Markič N., Optimiziranje in standardizacija postupkov v proizvodnji, Markič N., 2016
- [4] Ruiz-Arenas S., Horváth I., Mejía-Gutiérrez R., Z. Opiyo E.: Towards the Maintenance Principles of Cyber-Physical Systems, Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering, 60(2014)12, 815-831
- [5] Christi A., Gau Pagnanelli B., Sheeley J., S. Carson R., Presented by Kevin Knudsen: Model-Based Systems Engineering in an Integrated Environment, [http://www.itea.org/images/pdf/conferences/2013\\_SOS/Track\\_3\\_Knudsen\\_ModelbasedSystemsEngineeringinanIntegratedEnviroment.pdf](http://www.itea.org/images/pdf/conferences/2013_SOS/Track_3_Knudsen_ModelbasedSystemsEngineeringinanIntegratedEnviroment.pdf)
- [6] Elbeltagi E., Hosny O., Dawood M., Elhakeem A.: BIM-Based Cost Estimation/ Monitoring For Building Construction, Journal of Engineering Research and Applications [www.ijera.com](http://www.ijera.com) ISSN : 2248-9622, Vol. 4, Issue 7( Version 4), July 2014, pp.56-66
- [7] Hopkins H., (2008): "Applying Michael Porter's extended rivalry model to the robotics industry", Industrial Robot: An International Journal, Vol. 35 Issue: 5, pp.397-399
- [8] Galić M., Završki I., Dolaček-Alduk Z.: Scenarijski simulacijski model za optimalnu alokaciju građevinskih strojeva, Građevinar 68 (2016) 2, 105-112
- [9] Petrić, J., Operaciona istraživanja, Naučna knjiga Beograd, 1987
- [10] Mindjet softver, [www.mindjet.com](http://www.mindjet.com)
- [11] Križaić V.: Model standardization, VI. Internacional symposium «BUILDING ECONOMICS» Zagreb 1996, pp.(609-614, knj. II)
- [12] Križaić V.: Organization limit - Modeling and simulation, International Conference : Investmen strategies and management of construction, 20-24.8.1994., Brijuni, Croatia, pp.345-349
- [13] Elbeltagi E., Hosny O., Dawood M., Elhakeem A. : BIM-Based Cost Estimation/ Monitoring For Building Construction, Int. Journal of Engineering Research and Applications, Vol. 4, Issue 7( Version 4), July 2014, pp.56-66
- [14] Bukvić G.: Pascal, Školska knjiga Zagreb, 1995
- [15] Fallera C., Höftmanna : Service-oriented communication model for cyber-physical-production-systems, 11<sup>th</sup> CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, Procedia CIRP 67, 2018, 156 – 161
- [16] IBM sustav, [www.ibm.com/support/knowledgecenter/hr](http://www.ibm.com/support/knowledgecenter/hr)

- [17] Vranjković P.: Booleova algebra, Element, Zagreb, 1998
- [18] Radić M.: Algebra, Školska knjiga, Zagreb, 1989
- [19] Križaić V.: Proračun privremenih tesarskih konstrukcija sveden na dimenzije projektne dokumentacije, Dubrovnik 1991, pp. 343-349
- [20] Križaić V.: Application of Norms Models with Vectoral System in Konstruktion Projects, Journal of Civil Engineering an Architecture, USA (2014), ISBN 1934-7359 str. 722-728
- [21] Veljan D.: Kombinatorika s teorijom grafova, Školska knjiga Zagreb, 1989
- [22] Križaić V., Hranj D., Rodriiger T.: Utjecaj softverske matematike na modeliranje u graditeljstvu, 5. međunarodna konferencija INOVACIJE, TEHNOLOGIJE, EDUKACIJA I MENADŽMENT 4. i 5. travnja 2018., Sveti Martin na Muri, Croatia
- [23] Križaić V.: System adjustments through vector organization and technology, Creative Construction Conference 2019, CCC 2019, 29 June - 2 July 2019, Budapest, Hungary, 42

# Izgradnja modernih urbanih sredina i potreba reinženjeringa građevinskih poduzeća

Mario Kralj<sup>1</sup>, prof.dr.sc. Ivica Završki<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bomega usluge d.o.o., mario@bomega.hr

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, zavrski@grad.hr

## Sažetak

Fenomen pametnoga grada otvara nove prilike za građevinsku industriju, ali također predstavlja i značajan izazov za industriju koja je tradicionalno prilično sporo usvajala najnovije tehnologije i inovacije. Građevinskoj industriji potrebna je brza prilagodba i razvitak, kako bi prihvatila nove tehnologije i inovacije te nadogradnja i usklađivanje konvencionalne sposobnosti, procesa i modela s mogućnošću pametnoga grada. Već postoji niz novih tehnologija koje omogućavaju transformaciju industrije, poput sustava upravljanja informacijama i modeliranjem informacija o građevinama (engl. Building Information Modeling - BIM) te sustava za planiranje resursa poduzeća (engl. Enterprise Resource Planning - ERP). Zaključno, potrebna je prilagodba građevinske industrije na nove tehnologije i procese koji još nisu dovoljno razvijeni te će daljnje istraživanje biti usmjereno na reinženjering poslovnih procesa građevinskih tvrtki, kako bi bile spremne na daljnji razvoj pametnih gradova.

*Ključne riječi: reinženjering, poslovni procesi, informacijska tehnologija, ERP, pametni grad*

## Construction of modern urban environments and the need for construction companies reengineering

### Abstract

The smart city phenomenon opens up new opportunities for the construction industry, but it is also a significant challenge for an industry that has traditionally been slow to adopt the latest technology and innovation. The construction industry needs to rapidly adapt and develop, to adopt new technologies and innovations, and to upgrade and consolidate the conventional capabilities, processes and models with the ability of a smart city. There are already a number of new technologies that enable industry transformation, such as Building Information Modelling (BIM) and Enterprise Resource Planning (ERP) systems. In conclusion, it is necessary to adapt construction industry to new technologies and processes that are not yet sufficiently developed. Further research will focus on reengineering business processes of construction companies so as to make them ready for further development of smart cities.

*Key words: reengineering, business processes, information technology, ERP, smart city*

## 1 Uvod

Gradovi su glavni stupovi ljudske i gospodarske aktivnosti. Imaju potencijal stvoriti sinergiju koja osigurava velike mogućnosti razvoja svojim stanovnicima. Međutim, oni istovremeno generiraju širok raspon problema koji mogu biti zahtjevni za rješavanje, te rastu s obzirom na veličinu i kompleksnost. Gradovi su također mjesta gdje su nejednakosti jače te ako se njima ne upravlja ispravno, negativni učinci mogu nadmašiti pozitivne [1]. Adekvatna digitalna tehnološka rješenja poput sustava ERP i drugih pametnih tehnologija primjenjuju se na inovativan i učinkovit pristup upravljanja gradom, njegovim resursima, procesima i javnim uslugama. Uravnoteženo korištenje tehnologije omogućuje primjenu naprednih alata te pristup pravodobnim strukturiranim podacima koji su nužni za kvalitetno donošenje odluka i pametno upravljanje regijama i gradovima. Pametne tehnologije čine Internet stvari (engl. *Internet of Things* – IoT), umjetna inteligencija, društveni mediji, niskoenergetska rasvjeta i još mnoge povezane nove tehnologije [2]. Frost & Sullivan vjeruje da je koncept pametnog grada budućnost svakog modernog urbaniziranog grada. Svaki pametni grad ima jedinstveni broj značajki i karakteristika kao i jedinstvene poslovne mogućnosti. Građevinske tvrtke koje posluju na području pametnih gradova neće biti samo partneri i konvergirati međusobno, kako bi ponudili „pametna“ rješenja, već će se također početi približavati sudionicima drugih industrijskih grana. To će otvoriti više mogućnosti rasta u svim industrijama [3]. Pametna gradska tehnologija olakšava život gradskoj upravi i stanovnicima u sljedećim područjima: energija, tehnologija i inovacije, održivost, urbanizam i izgradnja, mobilnost i sigurnost. Sva ta područja zajedno čine tržište vrijedno više milijardi dolara, što je vrlo atraktivno za dobavljače. Međutim, pokazuje se da su trenutno pametna energija i pametna tehnologija najvažniji parametri pametnih gradova. Mobilnost građana i prometni uvjeti obično su najveći problemi u današnjim modernim urbanim gradovima. A sve je više zahtjeva u ekološki prihvatljivim rješenjima [4]. Pojava pametnih gradova brzo je osvojila maštu masovnog tržišta. Pametni gradovi su pojam koji definira konvergenciju nove gradske i državne politike, nove informacijsko-komunikacijske tehnologije (ICT) i inovativni dizajn u urbanoj sredini. Dodirne točke ovih triju elemenata stvaraju smislene, uzbudljive i unosne mogućnosti za građevinsku industriju širom svijeta. S obzirom na to da građevinske tvrtke direktno sudjeluju u izgradnji infrastrukture koja služi stanovništvu pametnih gradova, nužno je da zajedno sudjeluju u planiranju izgradnje pametnih urbanih sredina kako bi osigurali svjesnost i utjecaj na nove metode i inovacije. Pametni gradovi nisu samo pametne tehnologije, već je riječ o cjelokupnoj pametnoj izgradnji u kojoj su inovativne informacijsko-komunikacijske tehnologije (ICT) i rješenja usluga ugrađeni u inteligentne gradske strukture. Upravo u tome se nalazi prilika i izazov za građevinsku industriju. Novi tehnološki koncepti kao što su Big Data i IoT imat će golem utjecaj ne samo na

pristup industrije u izgradnji, nego i na upravljanje objektima i imovinom. Ove će tehnologije omogućiti industriji da upravlja produktivnošću i kvalitetom osnovnih zadataka. S druge strane, one će također imati ključnu ulogu u osiguravanju učinkovitijeg upravljanja objektima i utjecanju na to kako pametne strukture reagiraju na protok operativnih i okolišnih informacija u stvarnom vremenu [5]. Građevinska industrija treba reinventirati svoj temeljni pristup oblikovanju i planiranju. U kulturi pametne gradnje strukture će se morati biti holistički dizajnirane s ugrađenom inteligencijom kao standardnim svojstvom. Ključni pametni koncepti, kao što je optimizacija potrošnje energije i smanjenje utjecaja na okoliš, moraju postati ključni pokretači procesa planiranja i projektiranja. Ovakav pristup zahtijevat će novu i jedinstvenu perspektivu koja uključuje pametne materijale, koji odgovaraju okolišnim uvjetima, naprednim tehnikama, kao što su prefabrikacija i modularizacija čime bi se poboljšala kvaliteta i smanjio utjecaj na okoliš i nove tehnologije, kao što je 3D tisak i robotika [5]. Uspjeh pametnoga grada ovisi o savršenoj kombinaciji pametne politike, pametne infrastrukture i pametnih tehnologija. Građevinska industrija treba usvojiti pristup organskog razvoja cijelog grada, kako bi se ispunili koncepcijski, funkcionalni i tehnološki zahtjevi paradigme pametnoga grada. To također zahtijeva značajno više koordinacije i suradnje za stvaranje prostranog povezanog ekosustava entiteta i službi koje rade prema određenim zajedničkim ciljevima. To može predstavljati značajan izazov za industriju koja je tradicionalno preuzela pristup razvoju projekta.

## 2 Pregled literature

Reinženjering i reinženjering poslovnih procesa (engl. *business process reengineering* – BPR) jedna je od mogućnosti organiziranja i upravljanja poslovnim sustavom putem poslovnih procesa, njihovog preoblikovanja i informatizacije s ciljem postizanja što većih poslovnih učinaka [6]. Reinženjering poslovnih procesa je nastao s ciljem da se uštedama na projektu poboljšaju već razvijeni poslovni procesi u raznim područjima poslovanja, pa tako i u građevinarstvu. Reinženjering poslovnih procesa (BPR) je osnovno ponovno razmišljanje i radikalno ponovno projektiranje poslovnih procesa da bi se postigla odlučujuća poboljšanja presudnih, suvremenih mjera izvođenja kao što su: cijena, kvaliteta usluga i brzina [7]. Iz navedenih definicija BPR-a mogu se izdvojiti četiri ključne riječi koje opisuju glavne karakteristike BPR-a, a to su:

- TEMELJNI – znači promjena odgovora na pitanja tko smo mi, zašto radimo to što radimo i zašto radimo na način na koji radimo
- RADIKALAN – znači počevši od korijena, redizajniramo postojeću strukturu i organizacijske procedure, te izmišljamo potpuno nove putove za ostvarenje posla, u procesu preustroja odbacujemo sve postojeće načine rada i stvaramo nove

- DRAMATIČAN – želi se naglasiti da se u reinženjeringu poslovnih procesa ne možemo zadovoljiti nekim sitnim i malim poboljšanjima (nekim sitnim postocima poboljšanja od 10 %), već nam reinženjering treba za dramatične i temeljite promjene
- PROCESI – poslovni proces se definira kao skup aktivnosti koji uzima jedan ili više vrsta inputa i stvara output koji je od neke vrijednosti kupcu, pod reinženjeringom se smatra redizajn poslovnog procesa.

Svaka tvrtka koja odgovara na poslovne izazove mora se mijenjati, restrukturirati, reorganizirati i redizajnirati. Na današnjem tržištu koje se sve više globalizira prisutna je i sve oštrija konkurencija. Svaka tvrtka, koja želi opstati na tržištu i smanjiti tržišne nesigurnosti i neizvjesnosti, treba provoditi stalne promjene. Razlozi za provođenje reinženjeringa su postizanje veće konkurentnosti kompanije. U svakom poslu kupac je središte oko kojeg se sve vrti. Dakle, orijentiranost kupcu, u ovom slučaju potrebama grada i izgradnji pametne infrastrukture, postaje glavni cilj budući da je za svaki proizvod stvorena svjetska konkurencija.

Primjena informacijske tehnologije i razvoj menadžerskog informacijskog sustava tvrtke imaju ključnu ulogu u postizanju maksimalnih učinaka procesa reinženjeringa. Reinženjering je metoda koja u prvi plan stavlja modeliranje poslovnih procesa te zahtijeva kritičku analizu i redizajniranje poslovnih procesa u svrhu značajnog unapređenja performansi sustava. Tvrtke provode reinženjering kako bi tradicionalnu organizacijsku strukturu zamijenile organizacijom orijentiranom poslovnim procesima. Informacijska tehnologija (IT) obuhvaća opremu, programe i usluge čiji je cilj pružiti podatke, informacije i znanje pojedincima koji sudjeluju u poslovnim procesima, te tako omogućiti ostvarenje strateških ciljeva poduzeća. Uz ljudske resurse, informacijska tehnologija je ključan faktor u postupku reinženjeringa te se posebno ističe u aktivnostima kao što su definiranje poslovne strategije, identifikacija ostalih ključnih elemenata reinženjeringa poslovnih procesa, identifikacija i odabir procesa za redizajn, analiza strukture i tokova postojećih poslovnih procesa, mjerenje performansi postojećih procesa, dizajniranje novih procesa, implementacija i operacionalizacija novih i izmijenjenih procesa te komunikacija između članova projektnog tima. Reinženjering se danas povezuje s konceptom integracije poslovnih procesa te informacijske i komunikacijske tehnologije i sustava, ali i s neprestanim promjenama koje se svakodnevno događaju na tržištu, a koje tvrtke prihvaćaju kako bi održale svoju konkurentnost. Unutarnja prilagodba tvrtke na implementirane tehnološke alate predstavlja konkurentsku prednost pred drugim tvrtkama koju teško mogu preslikati, jer je unutarnja prilagodba rezultat vlastitog rada i prilagodbe tvrtke, odnosno zahtijeva se kreativno korištenje informacijske tehnologije [8].

Jedna od informacijskih tehnologija je i planiranje resursa poduzeća (engl. *Enterprise Resource Planning* - ERP). Primjena ERP sustava potječe već od 1960. godine [9].

ERP se može definirati kao pojam i kao sustav. Kao pojam odnosi se na integraciju poslovnih procesa unutar i izvan organizacije, kao i na standardizaciju poslovanja u smislu najboljih praksi. S druge strane, ERP kao sustav predstavlja tehnološku infrastrukturu oblikovanu da pruži potrebnu funkcionalnu sposobnost za uključivanje ERP pojma u stvarnost. Proizlazi da je ERP sustav zapravo tehnološka manifestacija ERP koncepta, odnosno da je za ostvarenje njegovih funkcija presudan razvoj informatičke tehnologije. U literaturi i praksi ERP sustav odnosi se na industrijski termin za visoko integrirani, aplikacijski softverski paket koji podržava rad integriranog informacijskog sustava u praksi, oblikovan je s dva osnovna cilja [10]:

- podržavanje poslovnih procesa radi veće efikasnosti obavljanja pojedinih poslovnih aktivnosti i poslovnog sustava u cjelini,
- osiguranje potrebnih informacijskih podloga za uspješno upravljanje složenim poslovnim sustavima

Najznačajnije tehnologije koje ERP sustavi nude su centralizirana baza podataka, umreženost preko jednog sustava koja omogućuje decentralizaciju, klijent – poslužitelj sustav (umjerenost prema korisniku koji traži uslugu ili robu koju poslužitelj izvršava tj. reproducira) te standardizacija poslovnih procesa i konkurentnost na tržištu [11]. Prema [12], ERP sustavi su alat za izgradnju integriranog informacijskog sustava bez kojeg su poboljšanja teško izvediva. Koristi od ERP sustava jesu: profitabilnost, brži pristup tržištu, konkurentnost, bolje korištenje kapacitetima, dostupnost usluga i proizvoda u globalnim razmjerima 24 sata sedam dana u tjednu. ERP aplikativna programska podrška treba imati najmanje tri od sljedeća četiri segmenta poslovanja: financijsko poslovanje, proizvodnju, robno-materijalno poslovanje i upravljanje ljudskim resursima i plaće.

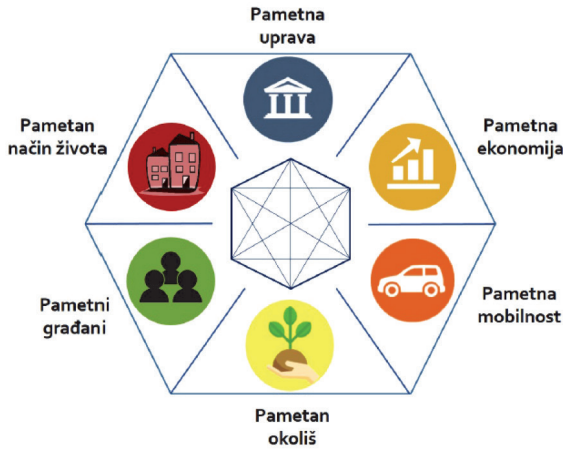
Pametni gradovi (engl. *Smart Cities*) su gradovi po mjeri čovjeka, odnosno razvijena urbana područja koja omogućavaju učinkovito korištenje prirodnih resursa i postojeće gradske infrastrukture, održiv gospodarski rast, podržavaju jačanje kapaciteta za istraživanje, razvoj i inovacije te osiguravaju visoku kvalitetu života i dostupnost javnih digitalnih usluga svim svojim građanima. Također, pametni gradovi integriraju sve funkcije javnih usluga poput rasvjete, prometa ili opskrbe energijom te na taj način povećavaju njihovu učinkovitost, smanjuju troškove energije, ubrzavaju komunikaciju među spomenutim podsustavima i znatno smanjuju emisije stakleničkih plinova. Najveći potencijali u osmišljavanju rješenja koja mogu odgovoriti na ove izazove nude se kroz kontinuirano razvijanje i korištenje novih inovativnih i tehnoloških postignuća i ubrzani razvoj informacijsko-komunikacijskih tehnologija (IKT), čime se otvara mogućnost za neposrednu i kontinuiranu komunikaciju građana s gradskom upravom, gradskim institucijama i pružateljima usluga u stvarnom vremenu, uz stalno podizanje svijesti građana o procesima planiranja razvoja grada i infrastrukture. Ubrzan razvoj naprednih tehnologija, inovativnih aplikacija i njihovo



korištenje u svakodnevnom životu rezultirali su idejom razvoja pametnoga grada koja postaje stvarnost u naprednim gradovima svijeta. Ključna svrha pametnih gradova je pružiti optimalnu kvalitetu života za sve građane u kombinaciji s najvišom mogućom razinom očuvanja resursa. To je ono čemu teže i hrvatski gradovi poput Zagreba, Rijeke i Dubrovnika. Navedeno se može postići samo inovativnim urbanim upravljanjem, odnosno razvojem korisnih rješenja na osnovi realnih podataka i informacija iz gradskog života koristeći pritom komunikacijske tehnologije, i to na način da one:

- povezuju različite izvore informacija omogućavajući na taj način sinergijske učinke
- postignu značajnu razinu efikasnosti i očuvanje resursa kroz integrirane pristupe i pri tome uključuju i građane i investitore u razvoj grada kako bi ga učinile što atraktivnijim, održivijim, otpornim na brojne izazove i posvećenom povećanju kvalitete života.

Koncept pametnog grada podrazumijeva upravljanje na bazi podataka koji se kontekstualno pretvaraju u informacije i u spoznaje o sustavu koji se promatra. Podaci se prikupljaju na različite načine, a IoT tehnologije omogućuju njihovo masovno prikupljanje s udaljenih lokacija putem mreže instaliranih senzora. Takav način prikupljanja podataka dovodi nas do činjenice o raspolaganju ogromnim količinama podataka, a time se omogućuje bolje upravljanje različitim sustavima. Na navedeni način, putem Internet stvari (engl. *Internet of things* – IoT), svakodnevno se prikuplja golema količina podataka (engl. *Big Data*) koju je potrebno analizirati i pravilno iskoristiti putem Podatkovnog centra (engl. *Data Centre*) koji objedinjuje prikupljene podatke. Pritom treba naglasiti da Podatkovni centar može biti vlasništvo nekog poslovnog subjekta ili se mogu koristiti usluge Podatkovnog centra putem računalnih oblaka (engl. *Cloud*). Temeljem analize prikupljenih podataka moguće je uočiti razne pojave u urbanoj sredini te planirati nove mjere za unaprjeđenje stanja u toj sredini. Pаметan grad integrira IKT-e i IoT rješenja kako bi na siguran i učinkovit način upravljao gradskom imovinom čime postiže integraciju različitih javnih usluga poput rasvjete, prometa, proizvodnje energije, ekologije i drugo. Na taj se način povećava učinkovitost javnih usluga, smanjuju troškovi te ubrzava komunikacija među podsustavima, a kao najvažnije ističe se znatno smanjenje emisija CO<sub>2</sub>. Jedan od preduvjeta za razvoj i korištenje IKT-e i IoT rješenja jest digitalizacija. Pojam digitalizacije koristi se za proces kojim se različiti oblici informacije kao što su tekst, zvuk, slika ili analogni signal, pretvaraju u jedinstveni binarni kod, odnosno digitalni diskretni oblik koji se može obrađivati putem računala [13]. Sukladno europskim dokumentima i praksi, na slici 1. prikazana su područja koja se podrazumijevaju pod pametnim gradom [14]: pametna ekonomija, pametna mobilnost, pametan okoliš, pametni građani, pametan način života i pametna uprava.



Slika 1. Područja pametnoga grada [14]

U stručnoj studiji *Mapiranje pametnih gradova u EU* [15], koja je izrađena na razini Europske unije, 2014. godine navedeni su i najuspješniji pametni gradovi: Amsterdam (Nizozemska), Barcelona (Španjolska), Kopenhagen (Nizozemska), Helsinki (Finska), Manchester (V. Britanija) i Beč (Austrija). Analiza projekata navedenih u studiji pokazuje da je 50 % projekata u pametnim gradovima orijentirano na izazove održivog razvoja i to putem energetske učinkovitosti zgradarstva i urbanog prometa.

### 3 Modeli građevinskog reinženjeringa

Prvi model reinženjeringa je stalno poboljšavanje, koje uključuje svakoga, i menadžere i radnike. Poboljšanja mogu biti (kontinuirani) porast ili (diskontinuirani) proboj neke kvote, količine, performanse. Pristup poboljšanju treba biti ugrađen na način na koji djeluje neka organizacija. Organizacije trebaju postati fokusirane na kupca, odnosno investitora preko timskog rada, koordinacije, udjela radnika i njihovog osposobljavanja, analize procesa i mjerenja performansi proizvodnog sustava, kao i uključivanja dobavljača u proizvodni proces. Inovacija procesa je bitna za upravljanje kvalitetom [16]. To dovodi do toga da, ukoliko se građevinski procesi trebaju ponovo planirati, onda upravljanje kvalitetom mora biti ugrađeno u okvir organizacije. Okruženje stvoreno ostvarenjem upravljanja kvalitetom treba osigurati osnove reinženjeringa.

Građenje s malim ulaganjem je drugi model reinženjeringa. Razvoj nove proizvodne filozofije i prakse s nižim troškom - "proizvodnje s malim ulaganjem" (engl. Lean Production - LP), ima cilj da se potrošnja resursa koji ne doprinose povećanju vrijednosti proizvoda, proizvodnje ili investicije svede na najmanju mjeru. Takva proizvodnja ima analogiju u građevinarstvu - građenje s malim ulaganjem. Proizvodnjom se

smatra protok materijala i/ili informacija od sirovina i materijala te ostalih resursa do finalnog građevinskog objekta. Osnovni princip građenja s malim ulaganjem je eliminacija aktivnosti koje ne dodaju vrijednost u procesu proizvodnje. Trošak proizvodnje s malim ulaganjima definira se kao aktivnost koja ne dodaje vrijednost proizvodu i može se eliminirati. Glavni tipovi troška su zastoji, ponovni rad, nepotreban transport, čekanje i nepotrebno kretanje [17]. Dodavanje vrijednosti građevinskom proizvodu - objektu provodi se eliminiranjem troškova (zastoja, nepotrebnih tehnoloških operacija, itd.).

Treći model je sveobuhvatni inženjering (engl. Concurrent Engineering - CE), odnosno sustavni pristup koji pokušava projektirati i realizirati objekt na integrirani i sveobuhvatni način, tako da na vrijeme otkrije negativne aspekte procesa proizvodnje. Zajednička karakteristika sveobuhvatnog inženjeringa, građenja s malim ulaganjima i reinženjeringa je ta da svi oni obraćaju veliku pažnju nedostacima modela proizvodnje [18]. Građevinski proces je suočen s prolaznom koalicijom sudionika koji imaju različite ciljeve. Koncept CE se zalaže za ostvarenje pristupa multidisciplinarnog tima u građevinarstvu donošenjem odluka zasnovanim na suradnji i sudjelovanju tima u koordinaciji i informacijama. Multidisciplinarni pristup može se postići uvođenjem izvođača radova, podizvođača i dobavljača za vrijeme faze projektiranja [19]. Podizvođačke i specijalističke organizacije imaju specifično znanje koje je važno za cjelokupno izvođenje radova i planiranje radova na gradilištu.

Upravljanje lancima opskrbe naveden je kao četvrti model reinženjeringa. Pristup upravljanju lancima opskrbe (engl. Supply Chain Management - SCM) zahtijeva i podrazumijeva integraciju i kooperaciju. Integracija se ogledava u upravljanju aktivnostima i procesima koji se tiču tokova robe i materijala (ali i znanja, informacija, pa čak i kapitala), a kooperacija se ogledava u uključivanju svih partnera i interesnih dionika, od dobavljača do krajnjeg korisnika. Upravljanje lancima opskrbe (SCM) metoda je sveobuhvatnog vrednovanja, upravljanja i kontrole lanaca opskrbe, s ciljem da se materijal isporuči pravodobno, po dogovorenoj količini, cijeni i kvaliteti. To podrazumijeva optimalne odluke u promjenjivim uvjetima okruženja. SCM metoda više odgovara privrednim granama s čistom industrijskom proizvodnjom (teška, ili prehrambena industrija). Međutim, ona se potpuno uklapa i u građevinarstvo, i mora biti fleksibilna, da bi mogla odgovoriti na nepredvidljive uvjete u građevinskoj proizvodnji.

## 4 Rasprava

Vodeći pokazatelji koje treba pratiti da bi se vidjelo slijedi li grad "pametna" put jesu zračne luke (nove ili proširenja postojećih), ceste, mostovi i tuneli, telekomunikacijska infrastruktura, hidrotehnički i energetske projekti. Ti pokazatelji postavljaju temelje za buduće inovativne projekte koji će se nadovezati na infrastrukturu. Nedavni projekti zračne luke u Abu Dhabiju, Singapuru, Šangaju, New Yorku i San Franciscu

dokazuju da je ovaj okvir ispravan, budući da se ti gradovi dosljedno navode kao vodeći pametni gradovi u svijetu danas. Osim toga, infrastrukturni projekti u Kansas Cityju, Wuhan, i Barcelona, pozicioniraju ove gradove da se pridruže redovima pametnih gradova na smislene i transformacijske načine [20]. Prvi utjecaj pametnih gradova na građevinsku industriju je u obliku unosnih, vodećih infrastrukturnih projekata, što rezultira novim poslovima i dobiti. Drugi utjecaj pametnih gradova su inovativni projekti koji izazivaju financijska sredstva, metode i potencijalne poslovne modele tradicionalnih građevinskih tvrtki. Nastaju projekti urbane obnove koji oblikuju ICT rješenja u same fizičke zgrade, pružajući stanovnicima grada interaktivno iskustvo sa svojim izgrađenim okruženjem. Inženjerski izraz za to je "stvaranje iskustva", ali je na građevinskom sektoru da ga razumije, da ga projektira i izgradi. Građevinske tvrtke koje razvijaju bliže odnose s ICT tvrtkama kako bi zajedno radile na ovim inovacijama, bit će u prednosti te mogu očekivati veće benefite. Vodeće ICT tvrtke kao što je Cisco već preuzimaju tvrtke izvan svog portfelja kako bi povećale tržišni udio i tržišne prilike. Cisco je nedavno kupio dvije energetske tvrtke - Ubiquisys i JouleX te naglašava put koji tvrtka poduzima kako bi svoju verziju pametnih gradova ostvarila. Prijelaz na interdisciplinarni pristup vjerojatno će biti vođen inovacijama u poslovnom modelu koje naglašavaju međufunkcionalna partnerstva među dionicima i osnažuju građevinske tvrtke da doprinose i uspješnije se natječu u ovom segmentu poslovanja. Izgradnja strateških i specijaliziranih partnerstava s ključnim dionicima u urbanističkom planiranju, urbanim uslugama i tehnologiji, bit će u razvojnom procesu od ključne važnosti za napredne tvrtke koje žele stvoriti održivu konkurentsku prednost. Treći utjecaj pametnih gradova jesu očekivanja kupaca građevinskih tvrtki. Bit će više interakcije s korisnicima, jer se jednostavnost mobilne videokomunikacije povećava u urbanim sredinama. Videopozivi s terena postaju uobičajena pojava, a tvrtke koje ne prate ovaj trend i način poslovanja bit će izostavljene iz sljedećih projekata, nadmašene od strane tvrtki koje komuniciraju sve učinkovitije. Sveprisutna priroda bežičnih veza sada se očekuje na terenu, posebno u urbanim projektima [16]. Mobilni i nosivi uređaji stalno redefiniraju način na koji industrija povezuje i surađuje u timovima, aktivnostima i web-lokacijama. Tehnološki poboljšana odjeća kao što su naočale, kacige, prsluci i tragači radikalno redefiniraju pristup industrije suradnji, produktivnosti, kvaliteti i sigurnosti. Ugrađene mogućnosti NFC-a i GPS-a mijenjaju način na koji industrija prati i upravlja protokom zaposlenika, opreme i materijala. Aplikacije virtualne stvarnosti (VR) i proširene stvarnosti (AR) omogućuju industriji da neprimjetno kombinira simulacije prije izgradnje s realnom izvedbom. Bepilotne letjelice (UAV) pomažu voditeljima projekata u praćenju napretka rada, učinkovitosti i produktivnosti. Ključna poruka ovog trećeg utjecaja je transparentna komunikacija. Komunikacija između građana i gradskih dužnosnika, gradskih i vladinih agencija te radnika na gradilištima, kao i svih dionika na građevinskom projektu, pod utjecajem su politika, tehnologija i dizajna koje pametni gradovi danas pružaju tržištu [21].

## 5 Zaključak

U radu je prikazano što je to fenomen pametnoga grada, te utjecaji takvog fenomena na građevinsku industriju. Napravljen je pregled literature kroz dvije specifične teme. Prva tema je reinženjering poslovnih procesa i primjena informacijskih tehnologija. Druga tema je fenomen pametnoga grada te utjecaj na prilagodbu i razvoj građevinske industrije potrebama pametne infrastrukture unutar takve sredine. Moderne tehnologije u pametnim gradovima osigurat će veću kvalitetu života, koja je potrebna s obzirom na sve veći udio stanovništva u gradovima, što uzrokuje probleme prenapučenosti i velikog zagađenja. Pametni gradovi, gradovi su budućnosti, a pojedini projekti koji podržavaju njihov razvoj upozoravaju na moguće probleme u njihovoj realizaciji, odnosno potrebnoj infrastrukturi, logičkom vodstvu i samim ljudima koji čine gradove. Kako bi gradovi postigli status pametnoga grada, ključna je uloga njihovih građana, ali i implementacija moderne i napredne tehnologije, te prilagodbe i razvoja građevinskih tvrtki kako bi mogle ispuniti zahtjeve izgradnje pametnoga grada.

Daljnje istraživanje bit će usmjereno na prilagodbu i razvoj, odnosno reinženjering građevinskih tvrtki kako bi udovoljile svim zahtjevima pri planiranju i stvaranju pametnih urbanih sredina. Prihvatanje novih tehnologija i inovacija, te nadograđivanje konvencionalnih poslovnih procesa kao i uvođenje ICT rješenja i usluga unutar svog poslovanja bit će nužno, žele li ostvariti konkurentnost na tržištu. Uz to izgradnja međusektorskih partnerstava s ključnim dionicima u razvojnom procesu ključno je za građevinske tvrtke koje žele sudjelovati u transformaciji gradova u pametne urbane sredine. Razvojem ovakvih smjernica napraviti će se korak prema povećanju standardiziranosti područja reinženjeringa građevinskih tvrtki. Promatrajući teorijske koncepcije područja pridonijet će se specifičnim temama unutar područja reinženjeringa građevinskih tvrtki, a u praksi će pružiti novi model koji će jasno određivati principe na koji način pristupiti reinženjeringu građevinskih tvrtki koje su spremne sudjelovati u transformaciji gradova.

## Literatura

- [1] Fernandez-Anez, V., Velazquez-Romera, G.: Smart cities: Concept and challenges., European Investment bank publication, p.80., 2015.
- [2] Effing, R.: Whitepaper Smart City Strategy: Creating a bridge between smart city technology and strategic city planning, University of Twente, 2017.
- [3] <https://www2.deloitte.com/us/en/pages/consulting/solutions/smart-cities-of-the-future.html> (pristupljeno 16.7.2019.)
- [4] Frost & Sullivan: Smart Cities, Frost & Sullivan, SAD, 2014.

- [5] <https://makemycitysmart.com/2017/12/02/construction-innovation-smart-cities/> (pristupljeno 16.7.2019.)
- [6] Žugaj, M., Schatten, M. : Arhitektura suvremenih organizacija, Tonimir i Fakultet organizacije i informatike Varaždin, Varaždinske Toplice, p. 28., 2005.
- [7] Hammer, M., Champy, J.: Reengineering the Corporation: A Manifesto for Business Revolution, Nicholas Brealey Publishing, London, p. 32., 1993.
- [8] Hammer, M., Champy, J.: Reengineering the corporation, a manifesto fro business revolutin, Nicholas Brealey Publishing, London, 2001.
- [9] Ibem, E. O., Laryea S.: Survey of digital technologies in procuremnet of construction project, Automation in construction, 46: 11-21, 2014.
- [10] Belak., S., Ušljebrka, I.: Uloga ERP sustava u promjeni poslovnih procesa. Oeconomica Jadertina, Vol.4 No.2., pp. 33-52., 2014.
- [11] Sumner, M.: Enterprise resource planning, Pearson Education, 2014.
- [12] Pavlić, M.: Informacijski sustavi, Školska knjiga, Zagreb, 2011.
- [13] <https://ekonzultacije.rijeka.hr/wp-content/uploads/2018/09/Nacrt-prijedloga-Strate%c5%a1kog-plana-Rijeka-Pametna-grad-2019-2020.pdf> (pristupljeno 16.7.2019.)
- [14] Frost & Sullivan: Smart Cities, Frost & Sullivan, SAD, 2014.
- [15] Manville, C., et. al.: Mapping Smart Cities in the EU, European Parliament, 2014.
- [16] Deming, W. E.: Out of the Crisis, Massachusetts Institute of Technology, Center for Advanced Engineering Study, Cambridge, MA, USA, 1986.
- [17] Womack, J. P., Jones, D. T., Roos, D.:The Machine That Changed the World, Harper Collins, NY, USA, 1990.
- [18] Koskela, L.: Application of the New Production Philosophy to Construction, Technical Report #72, Center for Integrated Facility Engineering, Department of Civil Engineering, Stanford University, USA, 1992.
- [19] Gunasekaran, A., Love, P. E. D.: Concurrent engineering: a multi-disciplinary approach for construction, Logistic Information Management: 11:5, pp. 295-300., 1998.
- [20] <http://constructionexec.com/article/the-impact-of-smart-cities-on-the-construction-industry> (pristupljeno 17.7.2019.)
- [21] <https://makemycitysmart.com/2017/12/02/construction-innovation-smart-cities/> (pristupljeno 16.7.2019.)



# Vrednovanje projekata cestovne prometne infrastrukture

Željko Štepan<sup>1</sup>, prof. dr. sc. Vesna Dragčević<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, stepan@grad.hr

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, vesnad@grad.hr

## Sažetak

Vrednovanje projekata cestovne prometne infrastrukture temeljni je način ocjene i analize ulaganja u pojedini projekt, te predstavlja nužnost pri ocjeni ekonomske opravdanosti i izboru optimalnog rješenja. Ispravno vrednovanje građevinsko-prometnog rješenja projekta pri tome je od presudnog značenja, a temelji se na ispravnom definiranju relevantnih indikatora. U radu su prikazani osnovni modeli vrednovanja projekata cestovne prometne infrastrukture. Dan je prikaz analize troškova i koristi s osnovnim parametrima potrebnim za izračun. Naznačena je problematika njihove primjene. Na primjerima iz prakse upozoreno je na nedorečenost modela te predložen pristup istraživanju, s ciljem poboljšanja modela vrednovanja projekata cestovne infrastrukture.

*Ključne riječi: vrednovanje, prometna infrastruktura, projekt ceste, troškovi, prometni indikatori*

## Evaluation of the road infrastructure projects

### Abstract

Evaluation of road-transport infrastructure projects is a fundamental way to evaluate and analyse investments in individual projects. The mentioned evaluation is considered necessary in economic justification, as a means to assess and choose an optimum solution. Proper evaluation of the construction-transport solution on a project is of crucial importance and is based on correct definition of relevant indicators.

Basic models for evaluating road transport infrastructure projects are presented in this paper. The cost and benefit analysis is presented together with basic calculation parameters and problems in their application. Practical examples point to imperfections of the model, and hence a research approach leading toward improvement of the road infrastructure project evaluation model is suggested.

*Key words: evaluation, traffic infrastructure, road project, costs, traffic indicators*



## 1 Uvod

Projekti cestovne prometne infrastrukture predstavljaju projekte koji se izvode ili kao ulaganja društvene zajednice ili kao profitabilni investicijski projekti ili kao neki oblik njihove kombinacije, a to je danas najčešće neki oblik javno privatnog partnerstva [1]. Neovisno o načinu investiranja procedura odlučivanja zahtijeva kompleksnu analizu. Potrebno je vrednovati projekt s aspekta koristi za društvenu zajednicu što zahtijeva uvođenje više kriterija odlučivanja te definiranje parametara investicijskih troškova danih kroz prometne indikatore.

Projekti cestovne prometne infrastrukture, prije svega oni od strateškog značenja za RH, odnosno lokalnu zajednicu uglavnom su investicijski projekti javnog karaktera. Specifični su u pogledu nositelja investiranja, uporabljivosti i vremena investiranja kao i značajnih neizravnih koristi, nakon izgradnje prometnice, za društvenu zajednicu na širem području kroz ostvarivanje značajnijeg dodatnog profita od društveno korisnih aktivnosti [2].

Tijek aktivnosti od ideje do realizacije projekata cestovne infrastrukture podrazumijeva sljedeće osnovne faze:

- planiranje
- projektiranje
- izgradnju
- održavanje.

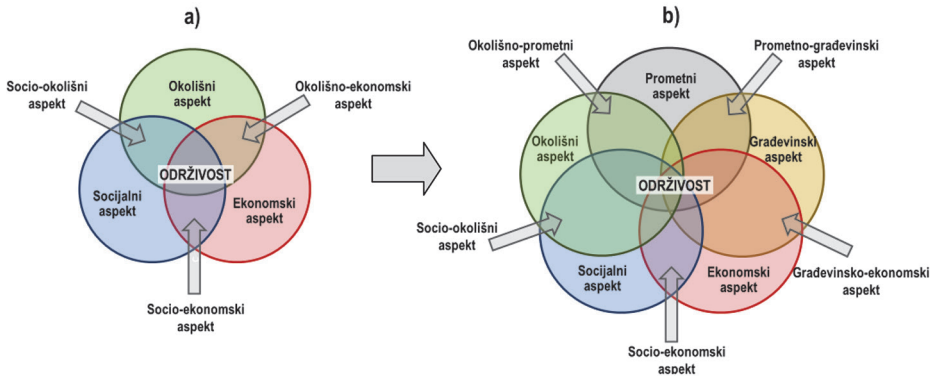
Svaka od navedenih faza zahtijeva [3]:

- donošenje odgovorne odluke o opravdanosti i prihvatljivosti ulaganja
- mogućnost praćenja i analize rezultata implementacije pojedinog rješenja.

Može se reći da projekti cestovne prometne infrastrukture predstavljaju investicijske projekte za koje se odluke donose na temelju analitičkih i sintetičkih pokazatelja učinaka koje projekt ostvaruje.

Investiranje u cestovnu prometnu infrastrukturu zahtijeva ulaganje značajnih novčanih sredstava koja je na globalnoj razini moguće ostvariti kroz korištenja sredstava Svjetske banke, Europske banke za razvoj, odnosno sredstava iz fondova Europske unije. Mogućnost korištenja tih sredstava zahtijeva donošenje odluke o financiranju. Prethodi joj ocjena potrebe za ulaganjem i izbor optimalnog rješenja [4] za što su propisane različite metode i višekriterijske analize [5, 6].

Ne tako davno izbor je optimalnog rješenja uobičajeno predstavljao analizu samo građevinskih i financijskih kriterija. Danas aktualan pristup zahtijeva uvođenje dodatnih kriterija za izbor rješenja koje omogućava održiv razvoj cestovne prometne infrastrukture (slika 1a [7, 8, 9]). Nameće se potreba da se i taj pristup unaprijedi, što je prikazano na slici 1.b.



Slika 1. Evolucija održivosti projekata cestovne prometne infrastrukture

Zbog specifičnosti i vrijednosti projekata cestovne prometne infrastrukture nameće se potreba i nužnost uključivanja najnovijih znanstvenih spoznaja za poboljšanje postojećih i razvoj novih metoda vrednovanja. Neizostavan dio procesa je izrada kompleksnog modela ocjene. Istraživanja koja bi se provela u okviru izrade doktorskog rada pridonijela bi izradi novog poboljšanog modela vrednovanja.

## 2 Metode vrednovanja projekata cestovne prometne infrastrukture

Vrednovanje projekata cestovne prometne infrastrukture predstavlja skup aktivnosti kojima je cilj odrediti opravdanost i prihvatljivost pojedinog projekta, a ujedno i odrediti razinu prioriteta ulaganja u određeni projekt.

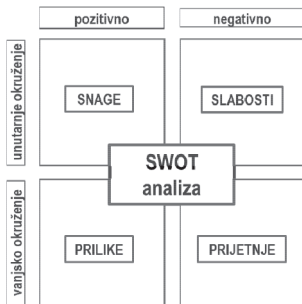
Danas su u primjeni uglavnom sljedeće metode za ocjenu i izbor investicijskih projekata, odnosno njihovo vrednovanje [9, 10]:

- metode SWOT analize
- metode višekriterijskog odlučivanja
- metode analize troškova i koristi.

### 2.1 SWOT analiza

SWOT analiza predstavlja suvremenu metodu kojom se daje kvalitativni opis predmeta istraživanja i u pravilu predstavlja instrument vrednovanja projekata u kreiranju strategija. To je kvalitativna analitička metoda kojom se kroz četiri osnovna čimbenika prikazuje snaga, slabost, prilike i prijetnje određenog projekta, te se na subjektivan način analizira čimbenike na način da se odredi kako analizirani projekt zadovoljava postavljene ciljeve. Prednost metode je što relativno brzo daje rezultate, jednostavna je za primjenu i učinkovita, dok je nedostatak nedovoljno preci-

zno definiranje kvantifikatora, pa je stoga upotrebljiva za razinu strateške odluke. Osnovni dijagram SWOT analize prikazan je na slici 2.



Slika 2. Dijagram SWOT analize

## 2.2 Višekriterijska analiza

Višekriterijska analiza (engl. multi-criteria analysis, MCA) model je koji se primjenjuje kada sve pokazatelje nije moguće prikazati kroz jedan kriterij, odnosno kada svi pokazatelji nemaju isti težinski udio u odlučivanju. Višekriterijska analiza primjenjiva je u slučaju odlučivanja između više projekata i više varijantnih rješenja istog projekta na temelju većeg broja kriterija o kojima se istovremeno odlučuje.

Višekriterijsku analizu moguće je provesti kroz dva osnovna aspekta ovisno o strukturi problema [10]:

- višeciljno odlučivanje
- višeatributivno odlučivanje.

Višeciljno odlučivanje predstavlja model koji se temelji na vrlo velikom broju varijanti koje nisu eksplicitno poznate na početku i do rješenja se dolazi matematičkim modelima. Model je primjenjiv za "dobro strukturirane" probleme i jasno definirane ciljeve. Višeatributivno odlučivanje predstavlja model koji se temelji na konačnom broju varijanti, a do rješenja problema se dolazi odabirom najbolje varijante ili skupa dobrih varijanti u odnosu na prethodno definirane attribute/kriterije i njihove težine. Model je primjenjiv za "loše strukturirane" probleme, a precizna određenost kriterija vrednovanja i strukturiranje ciljeva vrlo je zahtjevno.

Temelj odlučivanja u višekriterijskoj analizi čine kriteriji koje dijelimo na dvije osnovne skupine:

- skupina kriterija vrednovanih na osnovi egzaktnih i kvantitativno izraženih podataka
- skupina kriterija vrednovanih prema subjektivnoj ocjeni donosioca odluke.

Pregled kriterija i potkriterija [12, 13, 14], sistematiziranih na temelju analize literature i dosadašnjih istraživanja autora, koje bi trebalo uzeti u obzir pri odlučivanju metodom višekriterijske analize za vrednovanja projekata cestovne prometne infrastrukture prikazani su u tablici 1.

**Tablica 1. Prikaz mogućih kriterija odlučivanja za vrednovanje projekata cestovne prometne infrastrukture**

| KRITERIJ |                          | PODKRITERIJ |   |
|----------|--------------------------|-------------|---|
| 1        | Troškovi / financijski   | 1.1.        | Ukupni troškovi investicije                     |
|          |                          | 1.2         | Troškovi investicije po km novogradnje          |
|          |                          | 1.3         | Ukupni troškovi građenja                        |
|          |                          | 1.4         | Ukupni troškovi otkupa zemljišta                |
|          |                          | 1.5         | Troškovi održavanja                             |
| 2        | Prometni indikatori      | 2.1         | Zasićenost prometne mreže                       |
|          |                          | 2.2         | Vrijeme putovanja                               |
|          |                          | 2.3         | Sigurnost prometa                               |
|          |                          | 2.4         | Operativni troškovi vozila                      |
| 3        | Prostorno - urbanistički | 3.1         | Usklađenost sa strateški dokumentima            |
|          |                          | 3.2         | Usklađenost s prostorno planskom dokumentacijom |
| 4        | Ekološki                 | 4.1         | Utjecaj na klimatske promjene                   |
|          |                          | 4.2         | Utjecaj buke                                    |
|          |                          | 4.3         | Štetni plinovi                                  |
|          |                          | 4.4         | Utjecaj na vode i vodna tijela                  |
|          |                          | 4.5         | Utjecaj na krajobraz                            |
| 5        | Rokovi - provedba        | 5.1         | Vrijeme gradnje                                 |
|          |                          | 5.2         | Etapna izvedivost                               |
| 6        | Rizici                   | 6.1         | Financijski rizici                              |
|          |                          | 6.2         | Provedbeni rizici                               |
| 7        | Građevinsko-tehnički     | 7.1         | Duljina trase                                   |
|          |                          | 7.2         | Duljina i postotak objekata                     |
| 8        | Ekonomski                | 8.1         | Sadašnji troškovi                               |
|          |                          | 8.2         | Sadašnje koristi                                |
|          |                          | 8.3         | Neto sadašnja vrijednost (NSV)                  |
|          |                          | 8.4         | Interna stopa rentabilnosti (IRR)               |
| 9        | Sociološki               | 9.1         | Utjecaj na demografiju                          |

### 2.3 Analiza troškova i koristi

Analiza troškova i koristi (engl. cost-benefit analysis) predstavlja metodu ekonomske analize kojom se uspoređuju i vrednuju prednosti i nedostaci planiranog projekta kroz financijsku prizmu analizom troškova (cost) i koristi (benefit). Metoda predstavlja temelj za donošenje racionalne investicijske odluke i moguću korekciju projekata. Odlučivanje predmetnom metodom ogleđa se kroz društveno-ekonomsku perspektivu i financijsku učinkovitost, s ciljem izračuna financijske isplativosti, te u konačnici prikazom društvenih dobitaka i koristi stvorenih provedbom odabranog projekta [15, 16, 17, 18].

Osnovni kriteriji/parametri odlučivanja kroz navedenu metodu su:

- interna stopa rentabilnosti (IRR)
- neto sadašnja vrijednost (NSV)
- period povrata sredstava.

U sklopu analize troškova i koristi provodi se i dopunska analiza tzv. analiza osjetljivosti kojom se utvrđuje ovisnost osnovnih kriterija/parametara učinkovitosti na promjenu ulaznih vrijednosti. Rezultat je kvalitativni i kvantitativni prikaz “kritičnih varijabli planiranog projekta”.

Vrednovanje projekata cestovne prometne infrastrukture analizom troškova i koristi temelji se na dvije grupe ulaznih vrijednosti: troškovi i koristi.

U grupi **troškovi** to su:

- indikatori upravljanja (održavanje, administrativni troškovi upravljanja ...)
- investicijski indikatori:
  - troškovi otkupa zemljišta
  - troškovi građenja
  - troškovi pripreme (projektiranje, nadzor savjetovanje).

U grupi **koristi** to su:

- indikatori prihoda (cestarine, karte, pristojbe, prodaja ili najam zemlje ....)
- prometni indikatori:
  - uštede u vremenu putovanja
  - uštede u operativnim troškovima vozila
  - uštede u troškovima nesreća
  - ušteda ekoloških troškova (buka, štetni plinovi, staklenički plinovi).

Izračun indikatora upravljanja predstavlja učinak koji postiže planirani projekt i pokazuje koliko on djeluje na ukupne troškove projekta. Ovisi o specifičnostima gospodarskog subjekta koji upravlja cestovnom prometnom infrastrukturom na području na kojem je planiran projekt.

Osnovni izračun komponente troškova od faze planiranja do faze građenja predstavlja izračun investicijskih indikatora. Metodologija izračuna je nužno povezana i u međusobnoj je ovisnosti s razinom izrađene projektne dokumentacije, a proračun se izvodi u skladu s jediničnim cijenama za sve investicijske indikatore. U početnim fazama uzimaju se u obzir samo osnovne grupe i za neke indikatore provodi se gruba procjena, dok se kasnije u okviru razrade projekta indikatori dopunjuju i preciziraju. Dobro poznavanje strukture i veličine investicijskih troškova od velike je važnosti, jer oni značajno utječu na vrednovanje. Na taj se način postiže veća razina točnosti u višim fazama izrade projektne dokumentacije.

Prometni indikatori i njihova monetizacija predstavljaju specifičan segment izračuna zbog kompleksnosti problema koji se analizira. Temelj za izračun je prometni model izrađen analizom potražnje. Bitno je naglasiti da njegova izrada ne predstavlja postupak izračuna analize troškova i koristi, a niti metodu vrednovanja, već je samo ulazni podatak.

U okviru ove metode vrednovanja za izračune se koriste jedinični troškovi prometnih indikatora, što potencijalno predstavlja problem za usporedivost projekata, zbog značajne razlike u jediničnim cijenama, ovisno o donosiocu odluke. Zato je definiranje "univerzalnog" kataloga jediničnih cijena (barem na razini EU) nužnost kojom bi se povećala vjerodostojnost odlučivanja metodom analize troškova i koristi te pojednostavnila njena primjena.

## 2.4 Zaključno o metodama vrednovanja

Vrednovanje projekta cestovne infrastrukture zahtjevan je zadatak. Pri tome ne samo da je potrebno izabrati optimalnu metodu, već i pojedine indikatore koje metoda zahtijeva [8].

Redosljed primjene opisanih metoda vrednovanja [9, 10, 11] (slika 2.) u praksi je "korak po korak" od niže prema višoj razini. Vrednovanje svakom pojedinom metodom rezultira donošenjem odluke. Za donošenje odluke na višoj razini primjenjuje se sljedeća metoda u nizu, unatoč činjenici da je za određivanje nekih parametara potrebna njihova kombinacija [15].



Slika 3. Redosljed primjene metoda vrednovanja

Literatura iz ovog područja je opsežna, no kroz rad na brojnim projektima u praksi uočene su sljedeće manjkavosti: heterogenost kriterija ovisno o donositelju odluke, velika raznolikost u definiranju težinskih udjela pojedinih kriterija, što umanjuje pouzdanost primijenjenih metoda.

### 3 Postupak vrednovanja za konkretne primjere projekta cestovne prometne infrastrukture

Uvidom u praksu vrednovanja projekata cestovne prometne infrastrukture na prostoru Republike Hrvatske te iskustvo autora u procedurama vrednovanja, kao prvi korak postupka vrednovanja, nameće se potreba grupiranja projekata prema razini odlučivanja. Preliminarno istraživanje postupka vrednovanja provest će se za dvije grupe projekata: strateška i studijska razina projekata.

Prvi korak na primjerima iz prakse (grupiranje prema razini odlučivanja) je sljedeći:

- razina strateškog projekta koji uključuje više varijantnih rješenja (master planovi/glavni planovi razvoja prometne infrastrukture), gdje su razmatrani:
  - Master plan održive urbane mobilnosti grada Šibenika
  - Master plan funkcionalne regije sjeverna Dalmacija
  - Master plan funkcionalne regije sjeverni Jadran
- razina definiranog projekta (izabrana varijanta) kod kojeg se donosi odluka opravdanosti ili izvodljivosti odabrane varijante razmatrane su
  - Studija opravdanosti zaobilaznice grada Vodica (SO1)
  - Studija izvodivosti obilaznice Poreča (SO2)
  - Studija opravdanosti Veli Vrh – Pula – zračna luka (SO3)
  - Studija izvodljivosti dionice: Zaprešić - Prigorje Brdovečko - Harmica uključujući i dionicu: čvor Bobovica - Prigorje Brdovečko (SO4).

Drugi korak postupka vrednovanja je analiza primijenjenih metoda vrednovanja.

Za razinu strateškog planiranja bit će analizirani strateški projekti koji obuhvaćaju više projektnih rješenja i varijanti. Postojeći projekti temelje se na donošenju odluke u jednom slučaju samo na SWOT analizi, u drugom na modificiranoj SWOT analizi gdje se čimbenici ocjenjuju ocjenama od 1 do 5, a u trećem se odlučivanje temelji na prometnom modelu (prometni, ekonomski, ekološki učinci). Za ovu grupu projekata u ovom će koraku biti analizirani strateški projekti za koje su primijenjeni različiti postupci odlučivanja.

Za razinu studijskih projekata većinom se kao metode vrednovanja koriste višekriterijska analiza za odabir optimalne varijante i cost-benefit analiza odabrane varijante za ocjenu opravdanosti. Za ovu grupu projekata bit će u drugom koraku analizirana metoda vrednovanja i primijenjeni kriteriji s ciljem njihova ujednačavanja. Praksa pokazuje veliku heterogenost kriterija, kao što je za četiri projekta prikazano u tablici 2.

Cjelovito istraživanje navedene problematike pokazat će opravdanost predloženog postupka i upozoriti na potrebu njegove optimizacije.

Tablica 2. Prikaz kriterija vrednovanja za razinu definiranog projekta (izabrana varijanta)

|                         |   | SO1  | SO2   | SO3  | SO4  |
|-------------------------|---|--|---|--|--|
| Višekriterijska analiza | <b>ODABIR OPTIMALNE VARIJANTE</b>                     |  |   |  |  |
|                         | Kriteriji   | Tehničko-eksploatacijski<br>Ukupni troškovi<br>Prostorna ograničenja<br>Prirodna i stvorena ograničenja<br>Ekološka ograničenja<br>Broj i raster raskrižja<br>Preglednost<br>Prometna funkcionalnost | Tehničko-eksploatacijski<br>Ukupni troškovi<br>Prostorna ograničenja<br>Prirodna i stvorena ograničenja<br>Ekološka ograničenja<br>Broj i raster raskrižja<br>Prometna sigurnost<br>Prometna funkcionalnost | Prometno vrednovanje – 25%<br>Troškovi – 20%<br>Okoliš – 10%<br>Usklađenost – 10%<br>Institucionalna analiza – 5%<br>Rizici – 10%<br>Provedba, rokovi – 15%<br>Multimodalnost – 5%           | Prometno vrednovanje – 20%<br>CBA analiza – 30%<br>Okoliš – 30%<br>Usklađenost - 10%<br>Rizici – 10% |
|                         | Težinski udjeli                                       | NIJE PRIMIJEJENO   |   | PRIMIJEJENO  |  |
| Cost-benefit analiza    | <b>OCJENA INVESTICIJSKE ODLUKE ODABRANE VARIJANTE</b> |  |   |  |  |
|                         | Kriteriji   | Ekonomska neto sadašnja vrijednost (ENPV)<br>Ekonomska interna stopa povrata (EIRR)<br>B/C faktor  |   | Financijska neto sadašnja vrijednost (FNPV)<br>Financijska interna stopa povrata (FIRR)<br>Ekonomska neto sadašnja vrijednost (ENPV)<br>Ekonomska interna stopa povrata (EIRR)<br>B/C faktor |  |

#### 4 Ciljevi istraživanja

Na temelju iskustva i pregleda dosadašnjeg stanja područja vezanog za vrednovanje projekata cestovne prometne infrastrukture uočava se neuključenost svih utjecajnih parametara, nejasno definiranje ulaznih parametara za izračun indikatora vrednovanja, kriterija ocjene i njihovih težinskih vrijednosti. Slijedom toga moguće je definirati ciljeve planiranih istraživanja koji uključuju:

- definiranje parametara za investicijske indikatore
- detaljnu analizu utjecajnih investicijskih indikatora
- definiranje parametara za prometne indikatore
- detaljnu analizu utjecajnih prometnih indikatora
- definiranje dodatnih indikatora (socijalni, okolišni ....)
- detaljnu analizu utjecajnih dodatnih indikatora
- detaljnu analizu modela analize troškova i koristi
- definiranje kriterija za vrednovanje
- prijedlog optimalnog modela analize troškova i koristi za cestovne infrastrukturne objekte.



## 5 Zaključak

Ako se vodimo poznatom činjenicom da ne postoje “loši projekti”, već samo pogrešne odluke pri odabiru u postupku vrednovanja projekta, onda je iskazana u literaturi jasna težnja, za ispravnim izborom te poboljšanjem postojećih ili pak izradom novih modela i postupaka vrednovanja projekata cestovne infrastrukture.

Vrednovanje cestovnih projekata u kontekstu održivog razvoja prometne infrastrukture temeljni je zahtjev donositelju odluke. Pri tome je poželjno uključiti što je moguće u većoj mjeri kvantitativne kriterije za što je, zbog njihove specifičnosti, potrebno izraditi kompleksne modele. Izrada takvih modela nužno nameće potrebu primjene znanstveno utemeljenih metoda. Na taj se način pridonosi optimizaciji postupka ocjene i odabira dugoročno prihvatljivih rješenja. Tako se indirektno utječe i na podizanje kvalitete projektne dokumentacije, što je također u praksi svojevrsan problem.

Nameće se potreba za opsežnim istraživanjem na relevantnom uzorku, kako bi se eventualno utvrdile mogućnosti poboljšanja postojećih metoda i postupaka. To bi u konačnici uslijedilo izborom optimalnih rješenja koja opravdavaju velika financijska ulaganja te pružaju mogućnost implementacije kroz fondove EU, što je od presudne važnosti za gospodarstvo svake zemlje članice.

## Literatura

- [1] Pološki, D., Orsag, S., Majstorović, I., Njegovec, M., Stepan, Ž.: Metro u prometnom sustavu Dubrovnika, SABOR HRVATSKIH GRADITELJA 2012, Dubrovnik 2012., pp. 697-706
- [2] Silvije, O., Dedi, L.: Budžetiranje kapitala, Procjena investicijskih projekata, Masmedia, Zagreb, 2011.
- [3] Van Damme, O., Van Geelen, H., Courange, P.: The evaluation of road infrastructure development projects, 6th Transport Research Arena, 2016
- [4] Padjen, J.: Metode prostorno-prometnog planiranja, Informator, Zagreb, 1978.
- [5] Talvitie, A.: Evaluation of road projects and programs in developing countries, Transport Policy, Elsevier, Vol. 7, No. 1., pp. 61-72. 2000.
- [6] Renda, A., Schrefler, L., Luchetta, G., Zavatta, R.: Assessing the Costs and Benefits of Regulation, Study for the European Commission, Secretariat General, Brussels, 2013
- [7] Deluka-Tibljaš, A., Karleuša, B., Dragičević, N.: Pregled primjene metoda višekriterijske analize pri donošenju odluka o prometnoj infrastrukturi, GRAĐEVINAR 65 (2013) 7, pp. 619-631.

- [8] Pryn, M.R., Cornet, Y., Salling, K.B.: Applying sustainability theory to transport infrastructure assessment using a multiplicative ahp decision support model, *Transport*, 30 (3), pp. 330-341,
- [9] Sahely, H.R., Kenedy, C.A., Adams, B.J.: Developing sustainability criteria for urban infrastructure systems, *Canadian Journal of Civil Engineering*, NRC Research Press, <http://www.nrcresearchpress.com/>, Canada, 32 (2005) 1, pp. 72-85.
- [10] Hüging, H., Glensor, K., Lah, O.: Methodologies for cost-benefit and impact analyses in urban transport innovations, *Transport Innovation Deployment in Europe*, Wuppertal Institute, 2013.
- [11] Barić, D., Čurepić, D., Radačić, Ž.: Implementation of relevant methods in assessing traffic-technological projects, *Promet - Traffic & Transportation*, 19 (2007) 5, pp. 329-336
- [12] Litman, T.: What's it worth? Economic Evaluation for Transportation Decision-Making, Internet Symposium on Benefit-Cost Analysis Transportation Association of Canada ([www.tac-atc.ca](http://www.tac-atc.ca)) 2001
- [13] Tudela, A., Akiki, N., Cisternas, R.: Comparing the output of cost benefit and multi-criteria analysis: An application to urban transport investments, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Elsevier, 40 (2006) 5, pp. 414-423.
- [14] Vilke, S., Baričević, H., Maglić, L.: Kriteriji za vrednovanje kopnene prometne trase, *Suvremeni promet: časopis za pitanja teorije i prakse prometa*, 33 (2013) 1-6, pp. 422-427
- [15] Kazimieras-Zavadskas, E., Liias, R., Turskis, Z.: Multi-attribute decision-making methods for assessment of quality in bridges and road construction: State of the Art surveys *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 3 (3), pp. 152-160
- [16] Cascajo, R.: Assessment of economic, social and environmental effects of rail urban projects. *Yung Researchers Seminary*, The Hague 2005
- [17] Smjernice za CBA za projekte prometnica i željeznica, Ministarstvo pomorstva, prometa i infrastrukture, 2016.
- [18] Annema, J., A, Mouter, N., Razaei, J.: Cost-benefit Analysis (CBA), or Multi-criteria Decision-making (MCDM) or Both: Politicians' Perspective in Transport Policy Appraisal, *Transportation Research Procedia*, 10 (2015), pp.788–797
- [19] Schnabl, A., Platzer, G., Ecker, M., Fritzsche H., Hochmuth, B., Koch, S., Lappöhn, S., Pohl, A.: Guidelines for Cost-Benefit-Analysis of infrastructure projects, Institute for Advanced Studies Vienna, 2014., <http://www.southeast-europe.net/document.cmt?id=690>, pristupljeno 15.07.2019.
- [20] Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects, European Commission, Directorate-General for Regional and Urban policy, December 2014



## Trajnost armiranobetonskih željezničkih pragova

Ivan Zovkić<sup>1</sup>, prof. dr. sc. Stjepan Lakušić<sup>2</sup>

<sup>1</sup>HŽ Infrastruktura d.o.o., Antuna Mihanovića 12, Zagreb, ivanzovkic@gmail.com

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, laki@grad.hr

### Sažetak

Prilikom redovitih pregleda kolosijeka u Republici Hrvatskoj na pojedinim pružnim dionicama uočene su pukotine na prednapetim armiranobetonskim kolosiječnim pragovima. Pragovi na kojima su uočena oštećenja ugrađeni su u periodu od 1990. do 2003. na različitim područjima, na različitoj podlozi te na prugama različitoga intenziteta i vrste prometa. Kako bi se odredio uzrok oštećenja i procijenio preostali vijek trajanja ugrađenih pragova, potrebno je provesti ispitivanja i analize oštećenih i neoštećenih betonskih pragova te rezultate usporediti s iskustvima drugih željezničkih uprava koje imaju sličan problem. Na temelju dobivenih rezultata mogao bi se odrediti vijek trajanja betonskih pragova u ovisnosti o uvjetima u kojima se nalaze prilikom eksploatacije te to koliko još dugo oštećeni pragovi mogu ostati ugrađeni u kolosijek.

*ključne riječi: kolosijek, betonski pragovi, oštećenja betonskih pragova, uzdužne pukotine*

## Durability of reinforced-concrete track sleepers

### Abstract

During the regular track inspection of railway sections in different parts of the Republic of Croatia cracks have been spotted on prestressed reinforced-concrete track sleepers. These track sleepers were built-in between 1990 and 2003 in different parts of Croatia, on different surfaces, on railways of different intensity and used for various types of transport. In order to determine the cause of damage and to estimate the remaining service life of the built-in track sleepers, the concrete track sleepers, both damaged and intact, have to be inspected and analysed. The results have to be compared with the experience of different railway administrations which have similar problems. Based on the results obtained, the service life of concrete track sleepers can be estimated, depending on the conditions during the exploitation. It is also possible to estimated how long the damaged sleepers can function as a part of the railway.

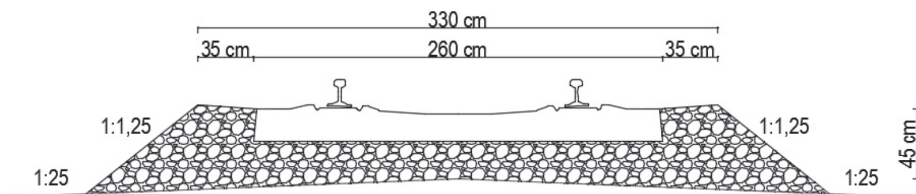
*Key words: railway track, concrete sleepers, damaged concrete sleepers, longitudinal crack*

## 1 Uvod

Prilikom održavanja pruga velika se pozornost posvećuje održavanju željezničkog kolosijeka koji se definira kao konstrukcija sastavljena od elemenata željezničkoga gornjeg ustroja [1]. U pruge kojima upravlja HŽ *Infrastruktura* dopuštena je ugradnja drvenih pragova (bukva, hrast), armiranobetonskih pragova te u iznimnim slučajevima čeličnih pragova [2]. Glavna zadaća kolosiječnih pragova jest:

- ravnomjerno prenošenje opterećenja koje nastaje sa željezničkih vozila preko tračnica na podlogu
- osiguravanje potpore i stabilnosti nožici željezničke tračnice i kolosiječnome priboru
- zadržavanje propisane širine kolosijeka i nagiba tračnice
- prigušenje vibracija tračnica i smanjenje razine buke koja nastaje prilikom kontakta kotača željezničkih vozila i tračnice [1].

Na slici 1. prikazan je propisani poprečni presjek zastorne prizme kolosijeka na betonskim pragovima [2].



Slika 1. Poprečni presjek zastorne prizme kolosijeka na betonskim pragovima [2]

Betonski pragovi ugrađeni su na oko 18 % kolosijeka na prugama u Republici Hrvatskoj. Najčešće ugrađeni tip jednodijelnoga prednapetog betonskog praga jest B70 s elastičnim kolosiječnim priborom. Armiranobetonski pragovi se ne smiju ugrađivati na nestabilnome donjem ustroju, na sastavima tračnica, 30 m ispred i iza mostova s otvorenom konstrukcijom, na skretnicama i križištima te na mostovima bez zastora. Zabranjeno je mješovito ugrađivanje drvenih i betonskih pragova [2]. Prednosti i nedostaci armiranobetonskih pragova prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Prednosti i nedostaci armiranobetonskih pragova [1]

|   |  |
|---|--|
| <p><b>Prednosti betonskih pragova:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– velika masa</li> <li>– tipska i brza proizvodnja</li> <li>– velika čvrstoća</li> <li>– dug vijek trajanja</li> <li>– otpornost na atmosferilije</li> <li>– ekološki prihvatljivi</li> </ul> | <p><b>Nedostaci betonskih pragova:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– manja elastičnost u odnosu na drvene pragove</li> <li>– osjetljivost na mehanička oštećenja prilikom iskliznuća željezničkih vozila</li> <li>– veliko dinamičko opterećenje na tucanički zastor</li> <li>– zahtjevnije održavanje za koje je potrebna pružna mehanizacija</li> </ul> |
|---|--|

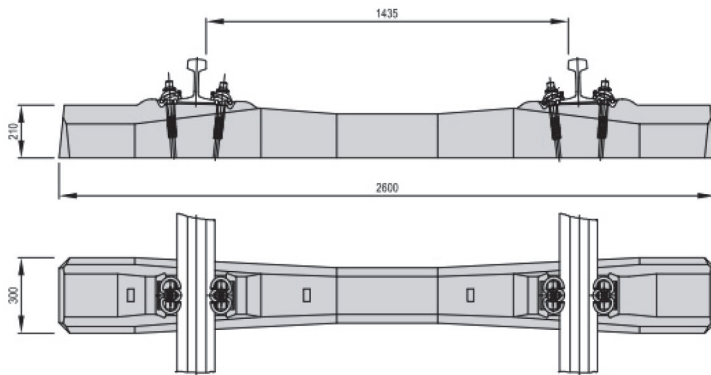
Prilikom stalnoga nadzora koji provode radnici *HŽ Infrastrukture* uočeno je to da su se na pojedinim dionicama željezničkih pruga u eksploataciji pojavile uzdužne pukotine na betonskim pragovima. Važno je otkriti uzroke nastanka pukotina te otkriti koliko još dugo ti pragovi mogu izdržati u kolosijeku s obzirom na okoliš i s obzirom na vrstu i opseg željezničkoga prometa, a da pritom nije ugrožena sigurnost prometovanja. Nakon što je problem sagledan, običen je teren te su prikupljeni osnovni podaci o ugrađenim pragovima i pružnim dionicama na kojima su se pojavile pukotine. Prilikom odabira dionica za promatranje vodilo se računa o tome da se nalaze na terenu različite konfiguracije, da su izložene različitim klimatskim uvjetima i da njima teku različite vrste željezničkoga prometa različitog opsega. U tablici 2. navedene su promatrane željezničke pruge s dionicama na kojima su uočene uzdužne pukotine na pragovima.

**Tablica 2. Promatrane pruge i pružne dionice**

| Naziv pruge:                 | Promatrana pružna dionica          |
|------------------------------|------------------------------------|
| M104 Novska – Tovarnik – DG  | Strizivojna – Vrpolje – Vinkovci   |
| M304 DG – Metković – Ploče   | Metković – Ploče                   |
| M604 Oštarije – Knin – Split | Oštarije (Krpelj) – Ličke Jasenice |
|                              | Rudopolje – Vrhovine               |
|                              | Ličko Lešće – Perušić              |
|                              | Gračac – Malovan                   |

## 2 Tehničke karakteristike jednodijelnoga betonskog praga

Armiranobetonski pragovi ugrađuju se u željezničke pruge od sredine 20. stoljeća. Trenutačno se na području EU-a proizvode tri vrste armiranobetonskih pragova: jednodijelni (HRN EN 13230-2), dvodijelni (HRN EN 13230-3) i pragovi za skretnice i križišta (HRN EN 13230-4). Ako se promatra njihova primjena u svijetu, posebno u Japanu, važno je istaknuti i primjenu okvirnih armiranobetonskih pragova. Proces proizvodnje betonskoga praga obuhvaća više koraka i vrlo je važno da se prilikom proizvodnje vodi stroga kontrola tvorničke proizvodnje. Riječ je o sljedećim koracima: priprema kalupa, postavljanje armature, prednapinjanje, ugradnja betona, vađenje pragova iz kalupa, montaža elastičnoga pribora i skladištenje. Zahtjevi za prednapeti betonski jednodijelni prag tipa B70 ovise o tipu tračnice za koji se proizvodi. Za tračnicu tipa 60E1 i 49E1, zahtjevi za prednapeti betonski jednodijelni prag tipa B70 jesu: širina kolosijeka 1435 mm, najveća dopuštena masa željezničkih vozila 250 kN/osovini, najveća dopuštena brzina 160 km/h, duljina 260 cm, širina najviše 30 cm, širina ležišta za tračnicu najmanje 16 cm, površina donje plohe 6804 cm<sup>2</sup>, masa praga približno 300 kg, nagib u području nalijeganja tračnica 1:40 i elastični kolosiječni pričvrtni pribor s izvedbom na zavrtnje.



Slika 2. Jednodijelni betonski prag tipa B70 [3]

Komplet elastičnoga kolosiječnog pričvrsnog pribora za jedan prednapeti armirano-betonski prag čine vijci za betonski prag (tirfoni) s prstenastim podloškom (4 kom.), elastične pritiskalice (4 kom.), sintetičke kutne pločice (4 kom.), sintetički podtračni podlošci (2 kom.) i plastična vijčana tipla (2 kom.).



Slika 3. Komplet elastičnoga kolosiječnog pričvrsnog pribora (Vossloh) za jedno ležajno mjesto [4]

### 3 Analiza vrsta pukotina

Uzdužne pukotine na betonskim pragovima sve su češća pojava kako na prugama HŽ Infrastrukture tako i na prugama mnogih željezničkih uprava Europe i svijeta. Pukotine se protežu paralelno s uzdužnom osi praga između dvaju pričvrtnih mjesta. Nastaju na poziciji plastične tiplje. Pragove na kojima su se u RH pojavile pukotine proizveo je isti proizvođač u periodu od 1990. do 2003. te se, prema dostupnim informacijama, tehnologija u to vrijeme nije mijenjala. Prilikom obilaska pružnih

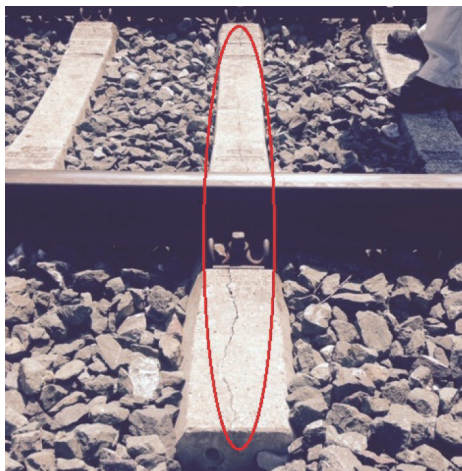
dionica na mreži HŽ Infrastrukture na kojima su se pojavile pukotine utvrđena su dva tipa pukotina:

- tip 1: uzdužne pukotine uz tiple (spoj tračnice i praga), maksimalne. dužine 30 cm sa svake strane tračnice, širine  $\leq 0,5$  mm, neravnomjerne i nepravocrtne
- tip 2: uzdužne pukotine po cijeloj duljini praga, širine pukotine  $\geq 1$  mm, neravnomjerne i nepravocrtne.

Pukotine tipa 1 (slika 4.) primijećene su na pruzi M304 DG – Metković – Ploče, dok su pukotine tipa 2 (slika 5.) primijećene na prugama M104 Novska – Tovarnik – DG i M604 Oštarije – Knin – Split.



Slika 4. Pukotina TIP 1



Slika 5. Pukotina TIP 2

### 3.1 Pruga M104 Novska – Tovarnik – DG (dionica: Strizivojna – Vrpolje – Vinkovci)

Dvokolosiječna pruga M104 Novska – Tovarnik – DG po cijeloj duljini ima uzdužni nagib do 6 ‰ i vodoravnu geometriju koja omogućuje brzine do 160 km/h. Iznimka su pojedinačni lukovi, uglavnom na ulazu u kolodvoru i na izlazu iz njega, na kojima je brzina ograničena na od 80 km/h do 140 km/h. Prugom teče mješoviti prijevoz. Na promatranoj dionici 1990. ugrađene su nove tračnice tipa 60E1 i novi kolosiječni pragovi s pripadajućim elastičnim priborom na zastor od tucanika debljine 45 cm i tamponski sloj debljine 40 cm. Kolosijek na promatranoj dionici Strizivojna – Vrpolje – Vinkovci dug je 63,9 km. Na promatranoj dionici uočena su 2803 puknuta praga, što iznosi 2,6 ‰ ukupnog broja ugrađenih pragova. U tablici 3. prikazan je opseg prometa na promatranoj pružnoj dionici.



**Tablica 3. Godišnji opseg željezničkog prometa na pruzi M104, Novska – Tovarnik – DG, dionica: Strizivojna – Vrpolje – Vinkovci**

| Naziv kolodvora       | Elektrifikacija<br>DA/NE | Vlak kilometri<br>PUTNIČKI<br>TERETNI | Brutotonski<br>kilometri<br>PUTNIČKI<br>TERETNI | Broj vlakova<br>PUTNIČKI<br>TERETNI | Bruto tone<br>[brtkm/km]<br>PUTNIČKI<br>TERETNI |
|-----------------------|--------------------------|---------------------------------------|---|-------------------------------------|---|
| STRIZIVOJNA – VRPOLJE | DA                       | 391.622                               | 81.353.643                                      | 16.692                              | 2.547.316                                       |
| VINKOVCI              |                          | 174.376                               | 147.984.090                                     | 7186                                | 4.633.625                                       |

### 3.2 Pruga M304 DG – Metković – Ploče (dionica: Metković – Ploče)

Jednokolosiječna pruga M304 DG – Metković – Ploče po cijeloj duljini ima uzdužni nagib do 3 ‰ i vodoravnu geometriju koja omogućuje brzine od 80 km/h do 110 km/h. Prugom teče teretni prijevoz. Godine 2003. na promatranoj su dionici ugrađene nove tračnice tipa 60E1 i novi kolosiječni pragovi s pripadajućim elastičnim priborom na zastor od tucanika debljine 45 cm i bez tamponskoga sloja. Dužina kolosijeka na promatranoj dionici Metković – Ploče iznosi 21,85 km. Na promatranoj dionici uočena su 344 puknuta praga, što iznosi 0,9 ‰ ukupnog broja ugrađenih pragova. U tablici 4. prikazan je opseg prometa na promatranoj pružnoj dionici.

**Tablica 4. Godišnji opseg željezničkoga prometa na pruzi M304, DG – Metković – Ploče, dionica: Metković – Ploče**

| Naziv kolodvora | Elektrifikacija<br>DA/NE | Vlak kilometri<br>PUTNIČKI<br>TERETNI | Brutotonski<br>kilometri<br>PUTNIČKI<br>TERETNI | Broj vlakova<br>PUTNIČKI<br>TERETNI | Bruto tone<br>[brtkm/km]<br>PUTNIČKI<br>TERETNI |
|-----------------|--------------------------|---------------------------------------|---|-------------------------------------|---|
| METKOVIĆ        | DA                       | 0                                     | 0   | 0                                   | 0   |
| PLOČE           |                          | 69 090                                | 74 243 223                                      | 4 451                               | 3 397 239                                       |

### 3.3 Pruga M604 Oštarije – Knin – Split (dionice: Oštarije/Krpeļ – Lička Jasenica, Rudopolje – Vrhovine, Ličko Lešće – Perušić, Gračac – Malovan)

Jednokolosiječna pruga M604 Oštarije – Knin – Split na dionici Oštarije – Plaški ima uzdužni nagib do 10 ‰, na dionici Plaški – Vrhovine do 23 ‰, na dionici Vrhovine – Perušić do 13 ‰, na dionici Perušić – Gračac do 7 ‰, a na dionici Gračac – Knin do 24 ‰ te vodoravnu geometriju koja omogućuje sljedeće brzine: na dionici Oštarije – Studenci od 70 km/h do 80 km/h, na dionici Studenci – Perušić od 100 km/h do 160 km/h, na dionici Perušić – Gračac 160 km/h te na dionici Gračac – Žitnić od 70

km/h do 80 km/h. Pruga je osposobljena za promet vlakova s nagibnom tehnikom koji u lukovima mogu postizati brzine veće od onih navedenih za konvencionalne vlakove. Prugom teče mješoviti prijevoz. Od 1999. do 2001. na promatranim dionicama ugrađene su nove tračnice tipa 49E1 i novi kolosiječni pragovi s pripadajućim elastičnim priborom na zastor od tucanika debljine 45 cm i bez tamponskoga sloja. Ukupna dužina kolosijeka na dionicama Oštarije/Krpelj – Lička Jasenica, Rudopolje – Vrhovine, Ličko Lešće – Perušić i Gračac – Malovan je 81,89 km. Na promatranim dionicama uočena su 17.803 puknuta praga, što iznosi 13 % ukupnog broja ugrađenih pragova. U tablici 5. prikazan je opseg prometa na promatranjoj pružnoj dionici.

**Tablica 5. Godišnji opseg željezničkog prometa na pruzi M604 Oštarije – Knin – Split, dionice: Oštarije/Krpelj – Lička Jasenica, Rudopolje – Vrhovine, Ličko Lešće – Perušić i Gračac – Malovan**

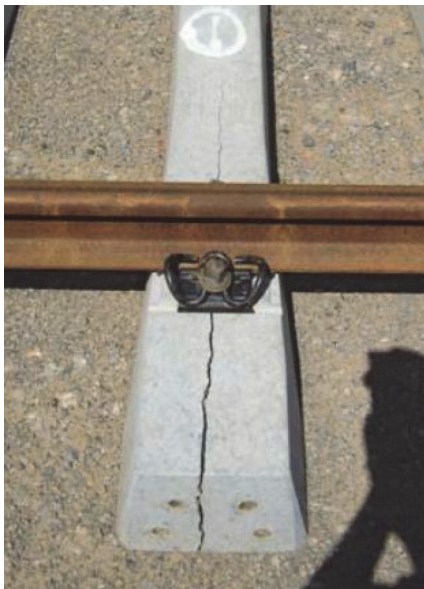
| Naziv kolodvora   | Elektrifikacija<br>DA/NE | Vlak kilometri<br>PUTNIČKI<br>TERETNI | Brutotonski<br>kilometri<br>PUTNIČKI<br>TERETNI | Broj vlakova<br>PUTNIČKI<br>TERETNI | Bruto tone<br>[brtkm/km]<br>PUTNIČKI<br>TERETNI |
|-------------------|--------------------------|---------------------------------------|---|-------------------------------------|---|
| OŠTARIJE (Krpelj) | NE                       | 172 843                               | 23 649 059                                      | 5 942                               | 378 736   |
| VRHOVINE          |                          | 152 525                               | 120 537 845                                     | 4 131                               | 1 930 397                                       |
| VRHOVINE          | NE                       | 199 501                               | 32 223 869                                      | 3 690                               | 354 108   |
| GRACAC            |                          | 179 953                               | 152 990 156                                     | 3 634                               | 1 681 211                                       |
| GRACAC            | NE                       | 140 424                               | 21 574 571                                      | 3 072                               | 336 787   |
| MALOVAN           |                          | 101 469                               | 91 103 984                                      | 2 169                               | 1 422 166                                       |

### 3.4 Iskustva Grčkih željeznica

Tijekom izvođenja radova na rekonstrukciji dionice Korint – Tripolis – Klamata 2007. na betonskim pragovima uočene su uzdužne pukotine te se pristupilo analizi navedene pojave i provedena su ispitivanja oštećenih pragova. Pukotine su uočene tijekom radova na osposobljavanju kolosijeka za privremeni promet. Većina je pukotina uznapredovala cijelom visinom praga, nastala je na mjestu pričvršćenja te se širila prema krajevima praga [5]. Na slici 6. prikazan je primjer uzdužne pukotine na betonskome pragu, po cijeloj visini presjeka.

Nakon što je problem pojave uzdužnih pukotina tijekom izvođenja radova na Grčkim željeznicama razmotren, pristupilo se analizi koja se sastojala od tri faze. Prva je faza obuhvatila prikupljanje podataka s terena, gdje je nadzor nad izvođenjem radova prikupljao podatke o vremenu proizvodnje te o momentima pritezanja vijaka na pragovima. Druga je faza obuhvatila prikupljanje podataka iz tvorničke proizvodnje

te rezultate tvorničkih ispitivanja. Treća je faza obuhvatila analizu svih dostupnih podataka. Nakon analize zaključeno je to da je razlog pojave pukotina visoka vrijednost momenta pritezanja vijaka (tirfona). Dokazano je to da momenti pritezanja veći od 450 Nm u kombinaciji s postojećim naprezanjima od prednapinjanja mogu uzrokovati pucanje betonskih pragova i pojavu uzdužnih pukotina [5]. Iako autori ne navode razloge pritezanja tirfona momentom dvostruko većim od potrebnog, pretpostavlja se da je do toga došlo zbog kvara uređaja za mjerenje momenta pritezanja.



Slika 6. Uzdužna pukotina na betonskome pragu [5]

### 3.5 Iskustva Iranskih željeznica

Nakon zamjene veće količine prednapetih betonskih pragova 2011., na njima su uočene uzdužne pukotine. Pukotine su se pojavile u području vijka i širile su se prema sredini i krajevima praga, a pojedine su pukotine uočene i prije puštanja pruge u promet [6]. Na slici 7. prikazana je pukotina koja se pojavila na mjestu ležišta tračnice, odnosno koja je krenula iz tiple ugrađene u prag.

Nakon što je navedena pojava primijećena, provedeno je ispitivanje na prakovima, a paralelno s tim rađene su i numeričke simulacije. Cilj je istraživanja bio utvrditi učinak nepravilnoga i prekomjernoga tlaka unutar rupa za tiple na okolni beton (od prekomjernoga pritezanja) i njegovu ulogu u pojavi uzdužnih pukotina. Prilikom istraživanja koristili su se pragovi koji su se ugrađivali na Iranskim želje-

znicama i pragovi koji su ojačani sa šest poprečnih armaturnih šipki. Numeričkim i eksperimentalnim istraživanjima na neojačanim i ojačanim pragovima utvrđeno je to da sile prednapinjanja u betonskim pragovima izazivaju znatna naprezanja oko rupe za tiple u poprečnome smjeru. Dokazano je da smrzavanje vode unutar tiple, prisutnost čestica agregata tijekom pritezanja vijaka te naginjanje i uvijanje vijaka ili tipli dovode do povećanja poprečnoga vlačnog naprezanja i pojave uzdužnih pukotina u prednapetim betonskim pragovima. Utvrđeno je da ojačani pragovi pokazuju veći otpor na pojavu uzdužnih pukotina jer su pri injektiranju veće količine kemijskoga sredstva pokazale bolja svojstva od neojačanih. Također je utvrđeno da korištenje poprečnih armaturnih šipki uzrokuje odgovarajuću vlačnu čvrstoću pragova i time je postignuto to da su uzdužne pukotine pod kontrolom [6].



Slika 7. Uzdužna pukotina na betonskome pragu

#### 4 Razlozi degradacije betonskih pragova

Zbog degradacije pragova na pojedinim pružnim dionicama u Republici Hrvatskoj prije kraja njihova projektiranoga životnog vijeka, uskoro će trebati zamijeniti veću količinu betonskih pragova, a što je vrlo dug i skup proces [7]. U skladu s time potrebno je znati stupanj oštećenja pojedinih pragova i potencijalnu mogućnost njihove daljnje upotrebe. Postoje mnogi razlozi koji utječu na trajnost betonskih pragova, a najčešći su pogreške i dotrajalost pričvrsnoga pribora, loše stanje zastora i pojava pukotine zbog utjecaja dinamičkih opterećenja [8]. Uzdužne pukotine mogu uzrokovati i početno nepravilno otpuštanje zatega nakon unosa sile prednapinjanja koje izaziva određena početna naprezanja u betonu. U cilju minimiziranja velikih vlačnih naprezanja u betonu, izvana se u beton uz pomoć prednapetog čelika unosi tlačno naprezanje te je zbog toga vrijednost sile prednapinjanja jedan od najvažnijih pa-

rametara prilikom projektiranja pragova. U procesu proizvodnje prednapinjanje se obavlja prije stvrdnjavanja betona [9]. Zbog prednapinjanja je vrlo važno to da se za pragove koriste betoni visoke čvrstoće (min. 50 N/mm<sup>2</sup>) [10]. Dinamička opterećenja kojima su izloženi betonski pragovi rezultat su međudjelovanja kotača vozila i tračnica. U praksi ta opterećenja dostižu velike iznose u slučaju nepravilnosti kotača, tračnica, pričvršćenja i brzine vozila. Takvo se opterećenje prikazuje kao periodičko udarno opterećenje koje varira u vremenu [10]. S obzirom na to da je prag u kolosijeku u interakciji s ostalim elementima gornjega i donjega ustroja, znatan utjecaj na prag ima kolosiječni zastor koji ima svoje propisane dimenzije, a česta je pojava da je zastor onečišćen, da nema zadovoljavajuću granulometriju, da je nepropisno zbijen i da takav nepovoljno utječe na pojavu vibracija u pragu [11]. Velik utjecaj na oštećenja i skraćeni vijek trajanja betonskoga praga u eksploataciji ima i okoliš u kojemu se prag nalazi. Pritom se misli na utjecaje kao što su kiša, sunce, smrzavanje i odmrzavanje, promjena temperature te razni kemijski spojevi u tlu i zraku koji mogu oštetiti strukturu i armaturu betona, ali i ubrzati degradaciju pragova. Navedeni vanjski utjecaji imaju nepovoljan utjecaj i na ostale dijelove kolosijeka koji utječu na trajnost pragova [8].

## 5 Ispitivanje betonskih pragova

Kako bi se došlo do pravoga uzroka nastajanja uzdužnih pukotina na betonskim pragovima, potrebno je provesti određena ispitivanja materijala od kojeg je izrađen prag te ispitati cijeli betonski prag kao sklop s kompletom pričvrsnoga pribora u skladu s normom HRN EN 13481-2 (Oprema za željeznice – Željeznički gornji ustroj – Zahtjevi za izvedbu kolosiječnog pričvrsnog pribora – 2. dio: Kolosiječni pričvrсни pribor za betonske pragove) i serijom normi HRN EN 13146 (Oprema za željeznice – Željeznički gornji ustroj – Ispitne metode za kolosiječni pričvrсни pribor). Također je potrebno provesti ispitivanje na pragovima koji su bili u eksploataciji, ali i na novim pragovima. U skladu s normom HRN EN 13230-2 (Oprema za željeznice – Željeznički gornji ustroj – Betonski pragovi i nosači – 2. dio: Prednapeti jednodijelni pragovi) pragovi se ispituju statički i dinamički na pozitivni moment savijanja na mjestu ležišta tračnice i na negativni moment savijanja u sredini praga. Navedena norma propisuje ispitivanje središnjega presjeka na pozitivni moment savijanja i ispitivanje na zamor na mjestu ležišta tračnice koje se sastoji od dva milijuna ciklusa opterećenja [11]. Ispitivanja novih armiranobetonskih pragova proteklih su se godina provodila u akreditiranome laboratoriju na Građevinskom fakultetu u Zagrebu. Opisani problem uzdužnih pukotina na armiranobetonskim pragovima u protekle su dvije godine razmatrali i predstavnici Građevinskog fakulteta u Zagrebu (Katedra za željeznice i Laboratorij za ispitivanje konstrukcija).

Kako bi se dobio cjelovit odgovor vezan uz uzroke oštećenja te kako bi se odredila preostala nosivost pragova, potrebno je provesti sljedeća ispitivanja:

- uzorkovanje bušenjem uzoraka iz elemenata prema HRN 12504-1 te ispitivanje tlačne čvrstoće prema HRN EN 12390-3
- uzorkovanje bušenjem uzoraka iz elemenata te ispitivanje na smrzavanje prema HRN CEN/TS 15199 u trajanju od 56 ciklusa
- bušenje uzoraka betonskoga praha i laboratorijsko ispitivanje pH vrijednosti betona po dubini
- bušenje uzoraka betonskoga praha i laboratorijsko ispitivanje sadržaja sumpora po dubini
- bušenje uzoraka iz elemenata te određivanje upijanja vode prema HRN EN 13230-1, prilog C
- uzorkovanje betona iz elemenata i ispitivanje ekspanzije betona prema Dugganu
- uzorkovanje betona, mikroskopska analiza skenirajućim elektronskim mikroskopom (SEM)
- statičko ispitivanje presjeka na mjestu ležišta tračnice prema HRN EN 13230-2
- statičko ispitivanje središnjega presjeka na negativni moment savijanja prema HRN EN 13230-2
- određivanje otpora na čupanje tirtfona prema HRN EN 13481-2 i HRN EN 13146-10
- dinamičko ispitivanje pričvrsnoga pribora prema HRN EN 13146-4
- vađenje valjaka u svrhu određivanja dubine prodiranja pukotina
- kemijska analiza betona.

Ispitivanjima bi bili obuhvaćeni oštećeni pragovi sa svih promatranih dionica na prugama kojima upravlja HŽ *Infrastruktura* kao i pragovi iz istoga proizvodnog pogona proizvedeni u promatranome periodu, a koji nisu ugrađeni u kolosijek. Također je predloženo ispitivanje pragova iz kolosijeka ugrađenih u posljednjih pet godina te ispitivanje novih betonskih pragova. Na taj bi se način dobio relevantan uzorak te bi se dobiveni rezultati mogli usporediti i kvalitetnije analizirati, jer se radi o usporedbi pragova koji su dio svojega životnog vijeka bili u kolosijeku i pragova koji nisu bili ugrađeni u kolosijek, a proizvedeni su u razmaku od najmanje 20 godina.

## 6 Zaključak

Pojava uzdužnih pukotina jest oblik degradacije pragova koji se pojavljuje na velikom broju pruga pod upravljanjem brojnih željezničkih uprava diljem svijeta. Prilikom istraživanja toga problema u svijetu otkriveni su različiti mogući uzroci pojave uzdužnih pukotina. Utvrđeno je to da razlozi puknuća mogu biti razni: pogreške nastale prilikom proizvodnje i prijevoza, nepravilna ugradnja ili ugradnja na podlogu koja nije propisno pripremljena te neodgovarajuće održavanje kolosijeka ili ošteće-

nja koja nastaju od neispravnih željezničkih vozila. U ovome slučaju cilj je doći do saznanja o razlozima pojave pukotina, o tome kolika je preostala nosivost oštećenih pragova te o mogućnostima njihove sanacije jer zamjena nije uvijek najbolje rješenje. Do navedenoga cilja planira se doći tako da se provede statičko i dinamičko ispitivanje oštećenih i neoštećenih pragova te ispitivanje materijala od kojih su izrađeni pragovi. Svakako je važno izraditi numerički model koji bi služio za predviđanje pojave pukotina na betonskim pragovima u ovisnosti o djelovanjima različitih vanjskih utjecaja.

## Literatura

- [1] Stipetić, A.: Gornji ustroj željezničkog kolosijeka, Sveučilište u Zagrebu Fakultet prometnih znanosti, 2008.
- [2] Pravilnik o održavanju gornjeg ustroja pruga – HŽI 314, HŽ Infrastruktura d.o.o., Sl. glasnik ZJZ br. 3/71, 5/71, 2/75, 5/76, 8/89 2/90 i 8-9/91; Sl. vjesnik br. 20/91, 5/04 i 8/04
- [3] Leonhard moll, <http://moll-betonwerke.de/en/>, pristupljeno 21.07.2019.
- [4] Agico Group, <http://www.rail-fastener.com/>, pristupljeno 21.07.2019.
- [5] Tsoukantas, S., Tzanakakis, K., Spyropoulou, D., Panopoulos, P., Mintzia, M.: Investigation on the Causes of Longitudinal Cracks on Prestressed Monoblock Railway Sleepers of Metric Gauge of the Greek Railway Network, International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Missouri, 2008.
- [6] Rezaie, F., Shiri, M., Farnam, S.: Experimental and numerical studies of longitudinal crack control for pre-stressed concrete sleepers, Engineering Failure Analysis, pp. 21-30, 2012.
- [7] Mikulić, I.: Analiza uzdužnih pukotina na armiranobetonskim željezničkim pragovima, Diplomski rad, mentor: Lakušić, S., Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2018.
- [8] Jokubaitis, A., Valivonis, J., Marciukaitis, G.: Analysis of strain state and cracking of concrete sleepers, Journal of Civil Engineering and Management, pp. 564-572, 2016.
- [9] Rezaie, F., Bayat, M., Farnam, S.: Sensitivity analysis of pre-stressed concrete sleepers for longitudinal crack prorogation effective factors, Engineering Failure Analysis, pp. 385-397, 2016.
- [10] Taherinezhad, J., Sofi, M., Mendisand, P.A., Ngo, T.: A review of Behaviour of Prestressed Concrete Sleepers, Special Issue: Electronic Journal of Structural Engineering, 2013.
- [11] Damjanović, D., Duvnjak, I., Bartolac, M., Frančić, M.: Statičko i dinamičko ispitivanje armiranobetonskih pragova, Dani prometnica 2013. – Mjerenja, ispitivanja i monitoring na prometnicama (ur. Lakušić, S.), Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, pp. 131-158.

## Overview of clay as supplementary cementitious material

**Matea Flegar**<sup>1</sup>, doc.dr.sc. **Marijana Serdar**<sup>2</sup>, dr.sc. **Diana Londono-Zuluaga**<sup>3</sup>,  
prof.dr.sc. **Karen Scrivener**<sup>4</sup>

<sup>1</sup>University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Department of Materials, mlegar@grad.hr

<sup>2</sup>University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Department of Materials, mserdar@grad.hr

<sup>3</sup>Laboratory of Construction Materials, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland, diana.londonozuluaga@epfl.ch

<sup>4</sup>Laboratory of Construction Materials, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland, karen.scrivener@epfl.ch

### Abstract

Locally available materials, like clays, present a potential to meet the growing concrete demand and to produce more sustainable material. This paper reviews the behaviour of common clay minerals (kaolinite, illite and montmorillonite) giving an insight into the complexity of clay soils that usually appear as mixtures of minerals and impurities. It is therefore crucial to perform reactivity study when considering clay as supplementary cementitious material (SCM). The paper also shows major clay excavation sites in Croatia highlighting those which will be a part of the Swiss-Croatian research project ACT.

*Key words: SCM, clay minerals, clay activation, calcination, reactivity*

## Upotreba glina kao mineralnih dodataka cementu

### Sažetak

Lokalno dostupni materijali, poput gline, predstavljaju potencijal koji može zadovoljiti rastuću potrošnju betona, ujedno i potrebu za održivom izgradnjom. Ovaj rad prikazuje ponašanja uobičajenih minerala gline (kaolinit, ilit i montmorilonit) objašnjavajući složenu strukturu gline koja se obično javlja kao mješavina minerala i nečistoća. Iz tog je razloga važno odrediti reaktivnost gline prilikom razmatranja njene primjene kao dodatka cementnu. Ovaj rad također predstavlja pregled značajnijih nalazišta gline u Hrvatskoj, ističući ona koja će biti dio švicarsko-hrvatskog istraživačkog projekta ACT.

*Ključne riječi: mineralni dodaci cementu, minerali glina, aktivacija gline, kalcinacija, reaktivnost*



## 1 Introduction

Current production of Portland cement clinker accounts for 5 to 8 % of the global CO<sub>2</sub> emissions [1]. Considering the constant growth of the building industry, if there are no actions taken, according to the worst case scenario, until 2050 the cement production could count for more than 25 % of the overall emissions [2]. For the production of 1 ton of cement clinker an average of 0.67 to 0.8 tonnes of CO<sub>2</sub> is produced (depending on the fuel type and blends) [3]. There are two ways in which the CO<sub>2</sub> emits while producing Portland cement. About 40 - 50 % is released while heating the cement kiln on the temperature of 1450°C, and the rest (50 - 60 %) comes from decarbonation of calcium carbonate (CaCO<sub>3</sub>). The CaCO<sub>3</sub> content in raw materials used for Ordinary Portland cement production is about 75 to 79 % [4], making partial replacement of clinker with supplementary cementitious materials (SCMs) a promising option for a more ecological production of concrete.

Certain industrial by-products show encouraging results in the clinker substitution [5-7]. Fly ash from coal power plants and steel furnace slags have been broadly used as SCMs, but the reserves of these materials are not sufficient to satisfy the cement production demand. The amount of industrial by-products available depends on the production of this industry, which means it is relying on the local economic development and not controlled by the cement industry [8]. Therefore, there is a need to focus on accessible materials that can supply the growing demand of cement usage. With its abundance all over the world and its low cost, clay and its alternations (obtained with calcination) could be a part of the solution that is needed. Currently, researchers are exploring the possibilities of different clay types that could be efficiently used as a SCM. The Swiss-Croatian collaborative project ACT is a part of this research, investigating the potential of locally available clay as partial replacement in standard and high-performance concrete.

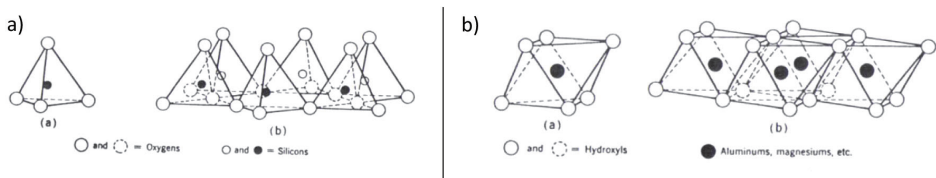
## 2 Types and mineralogical composition of clay materials

According to the Association Internationale pour l'Etude des Argiles (AIPEA) and the Clay Minerals Society (CMS), clay is defined as: „*a naturally occurring material composed primarily of fine-grained minerals, which is generally plastic at appropriate water content and will harden with (sic) dried or fired*” [9]. “Clay minerals” are phyllosilicate minerals that contribute to the plasticity of clay and which harden while drying or firing [9]. Although particle size is often mentioned as the key parameter for defining clay, there is no generally accepted granulometry. In geoen지니어ing the maximum size of the clay grain is 2 μm [10], other sciences set the limit lower. Parameters like plasticity are also mentioned, in terms of “plasticity index”

(PI) which shows the difference in water content between the liquid and the plastic limit of soil [11]. In practice clays can be divided into four main types:

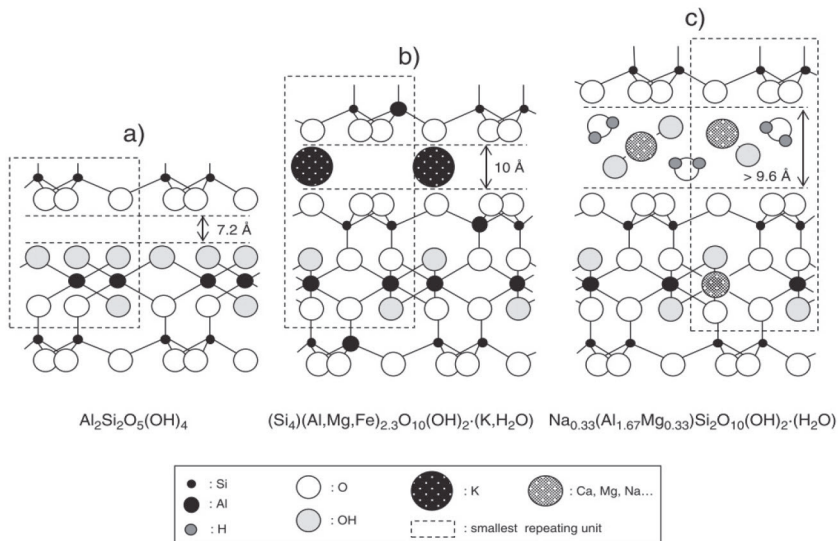
- bentonites predominantly composed of montmorillonite (smectite)
- kaolins consisting of kaolinite
- palygorskite and sepiolite which are a group of minerals mostly made of hydrated magnesium silicates
- “common clays” most often consisting of diverse variations of clay minerals, but often containing illite or smectite [11].

Clay minerals in general are generated by weathering of silicates in rocks such as feldspar, micas, etc. Their structure is formed from tens or hundreds of layers with a combination of aluminium and silicon sheets. Each sheet is constructed out of tetrahedral or octahedral connections shown in the Figure 1. In the silica layer silicon is surrounded by bonds to four oxygen atoms so that they form a tetrahedral arrangement. The formation of a layer is derived by connecting tetrahedral that share one oxygen ion. The octahedral group forms around one aluminium that is connected to six oxygen ions, which then form the alumina sheets.



**Figure 1. a) Silicon tetrahedron and silica tetrahedra arranged in a hexagonal network. b) Octahedral unit and alumina octahedral sheet structure [12]**

Most commonly found clay minerals that contribute to clay formation are kaolinite, illite and montmorillonite. The representation of their structure given by Fernandez et al. [13] that was adapted from Grim [14], shows the difference in layer composition and the chemical formulation of the 3 minerals (Figure 2). Kaolinite is formed by repeating layers in combination of one silica sheet and one alumina sheet (1:1 mineral). The sheets are linked by hydrogen bonding which forms a strong bond leading to its non-swelling property [11]. The other two clays structures have the unit layer composed of two tetrahedrons silicon sheets wedged around an alumina octahedral sheet (2:1 layer group).



**Figure 2. Structure and ideal formulas of clay minerals a) kaolinite, b) illite and c) montmorillonite [13]**

Naturally, more than only these three minerals can be found in the soil. It is often that interstratifications of two or more layers can occur in nature [11]. Also, isomorphous substitution of cations in these type of sheets is frequent. In tetrahedral sites  $\text{Si}^{4+}$  can be substituted by  $\text{Al}^{3+}$ , octahedral sites are generally occupied by  $\text{Mg}^{2+}$  and other cations like  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ , etc [15, 16].

### 3 Reactivity of clay materials

According to the ASTM C125 [17] terminology pozzolan is a siliceous and aluminous material which, in itself, possesses little or no cementitious value but which will, in finely divided form in the presence of moisture, react chemically with calcium hydroxide at ordinary temperature to form compounds. Clays, in their natural forms, do not possess pozzolanic properties. The activation of clay material happens when their crystalline structure is converted into an amorphous or disordered state. This can be accomplished by mechanical, chemical or thermal treatments of the raw material. Mechanical methods include treatments based on prolonged grinding. Numerous studies show satisfactory results in terms of amorphization and dehydroxylation of kaolinite phases and an increase in specific surface area [18-20]. Chemically clay can be activated using acid or alkaline activators which promote the solubility of silica and alumina depending on the method and clay minerals in the sample [21, 22]. Thermal methods imply heating of samples to remove structural water which is a process called calcination [20] and which will be explained below.

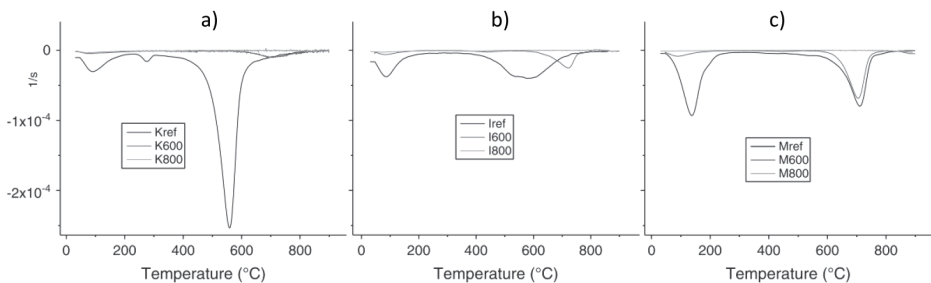
### 3.1 Calcination

Thermally activating clay minerals by calcination changes their crystalline structure. By transforming into amorphous phases, the pozzolanic reactivity of clay increases. With the variety of clay materials, the pozzolanic activation is depended on their mineralogy, strain in the bonds, the heating rate, and the impurities present in the material [23]. There are four main reactions that take place in clays when thermally treated at different temperatures:

- dehydration - loss of structure and absorbed water < 180°C
- dehydroxylation between 180 - 500°C
- structure breakdown - rupture of bonds and collapse of clay structure 600 - 800°C
- recrystallization - formation of new high temperature phases between 900 - 1000°C [24].

Pozzolanic reactivity of clay is depended on the completion of the dehydroxylation process, the obtained specific surface area, avoiding recrystallisation and the amount of incorporated clay and non-clay material [25].

The derivative thermo-gravimetric (DTG) curves in the Figure 3 a), b) and c) show the loss of mass during heating for the three main minerals: kaolinit, illite and montmorillonite, respectively.



**Figure 3. DTG curves of three clay minerals and their calcined products: a) kaolinite, b) illite, c) montmorillonite [13]**

The presented curves show the difference between the raw material (reference) and their calcined product (heated on 600 and 800°C). The first slight loss is observed between 30-200°C, the loss of absorbed water. Montmorillonite shows more significant release of water. The dehydroxylation process is observed in the range of 400-800°C, where kaolinite shows the most weight loss and therefore produces more anhydrous phases. The position of the peak in this range is depended on the structure and the binding of hydroxyls, whereas the shape of the curve and the range vary on the crystallinity or the particle size distribution [13].

### 3.2 Assessing reactivity of clay in cement pastes

There are a few techniques that can be used for the identification and quantification of the hydration products in a blended cement paste. X-Ray diffraction together with Rietveld analysis is one of them, and has been used in numerous studies [20], [26]. In the study done by Fernandez and Scrivener [27] the reduction of CH peaks in different calcined clay blended systems was used as an indication of their reactivity (Figure 4).

From the figure, it can be noted that calcined kaolin mixtures (K600, K800) show a significant reduction of the CH component. The same cannot be concluded for the illite (I600, I800) and montmorillonite (M600, M800) mixtures, even though there is a small reduction of the peaks in the montmorillonite blends.

XRD results combined with thermogravimetric analysis allow quantification of the CH consumption in the hydration process. It is observed in Figure 4 b) that only calcined kaolinite effectively consumes portlandite, followed by montmorillonite calcined at 600°C.

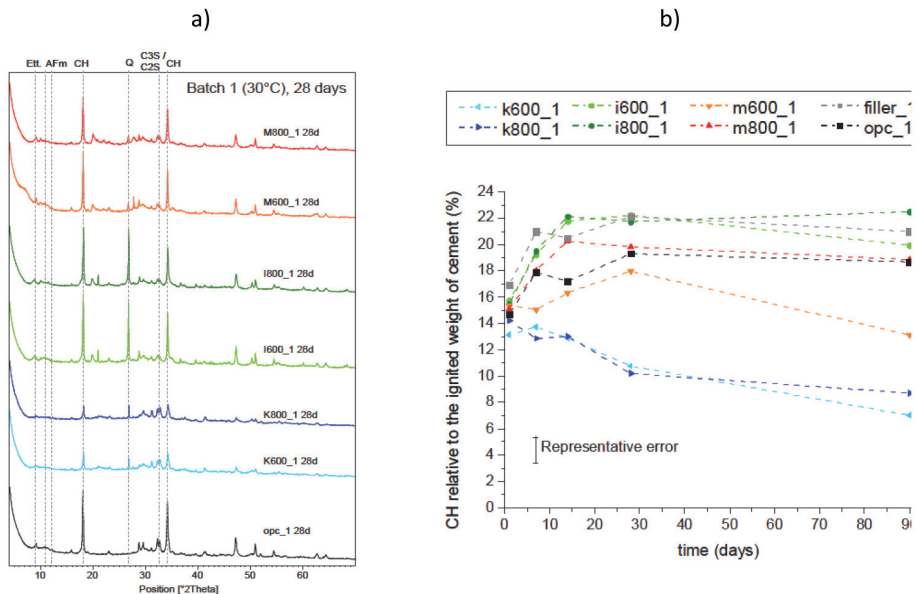


Figure 4. a) 28 days XRD patterns of blended clay cement pastes, b) Calcium hydroxide (CH) content at different ages of clay cement pastes [27]

## 4 Availability of clay in Croatia

Croatia is located at the intersection of Central Europe, the Balkans Peninsula and the Mediterranean. Geologically, the land is divided into two main provinces, the Pannonian basin and the Dinarides which differ in geographic and geological aspects. Most of the clays settlements can be found in the northern parts of the region, associated with the Pannonian basin [28].

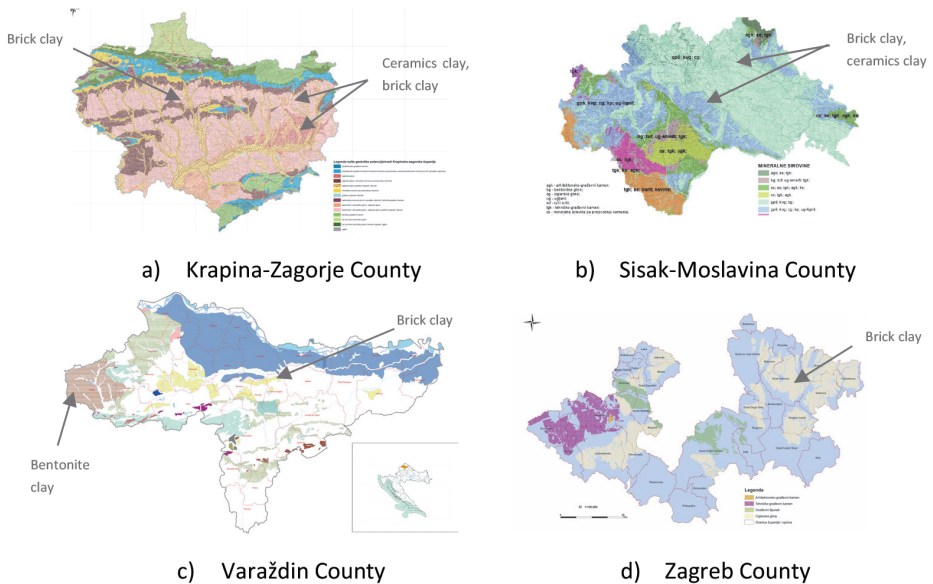


Figure 5. Clay deposits in four northern regions in Croatia [29-32]

Grizelj et. al. [33] have performed mineralogical and geochemical characterization of sedimentary rocks in the Croatian part of Pannonian Basin. The most common minerals they found in the fifty-two samples are smectite or illite smectite, even though there are some minor portions of kaolinite and illite in all samples. Crnički, J. and Šinkovec, B. [28] state the raw materials used for the brick industry in the region are composed of montmorillonite-kaolinite-illite type of clays.

Table 1 presents the collected data on current state of clay excavation sites in Croatia. From the list of 32 excavation sites [34] dating from 2015, only eleven sites and factories are currently in function. The rest of the mentioned concessioners have closed the excavation sites due to economic reasons, either the high cost of up keeping the sites or the low production value. Although the number of active clay excavation sites is reasonably low, the number of previously existing ones points out the broadness of clay deposit the region.

**Table 1. Excavation sites of clay in the Republic of Croatia with indicated sites from which samples are collected for ACT project**

| Excavation sites in Republic of Croatia |                     |                            |               |                      |                          |
|---|---------------------|----------------------------|---------------|----------------------|--------------------------|
| Nb.                                     | Excavation site     | Concession                 | Type of Clay  | Total resources [ha] | Notes                    |
| <b>Zagreb County</b>                    |                     |                            |               |                      |                          |
| 1                                       | Zapadno glinište    | Tempo d.d.                 | Brick clay    | 10,35                | Brick factory closed     |
| 2                                       | Vrbovec             | Gradip d.d.                | Brick clay    | 31,46                | Brick factory closed     |
| 3                                       | Mraclin             | Cigлана Mraclin d.o.o.     | Brick clay    | 48,55                | Excavation site closed   |
| 4                                       | Pedalj              | Inker d.d.                 | Ceramics clay | no record            | Excavation site closed   |
| <b>Zagreb City</b>                      |                     |                            |               |                      |                          |
| 5                                       | Novačica            | Termoblok d.o.o.,          | Brick clay    | 88,06                | Brick factory closed     |
| 6                                       | Soblinec            | Vodoprivreda zagreb d.d.   | Brick clay    | 8,1                  | Excavation site closed   |
| <b>Varaždin County</b>                  |                     |                            |               |                      |                          |
| 7                                       | Cerje Tužno         | Cigлана Cerje Tužno d.o.o. | Brick clay    | 54,47                | Samples collected        |
| 8                                       | Čret                | Cigлана Cerje Tužno d.o.o. | Brick clay    | 27,14                | Excavation site closed   |
| 9                                       | Cukavec I           | Leier -Leitl d.o.o.        | Brick clay    | 17,04                | Samples collected        |
| 10                                      | Cukavec II          |                            | Brick clay    | 7,4                  | Samples collected        |
| 11                                      | Ludbreški vinogradi | Cigлана Kovačić d.o.o.     | Brick clay    | 8,84                 | Brick factory closed     |
| 12                                      | Lukavec             | Cigлана Cerje Tužno d.o.o. | Brick clay    | 32,86                | Excavation site closed   |
| <b>Međimurje County</b>                 |                     |                            |               |                      |                          |
| 13                                      | Šenkovec            | Eko Međimurje d.d.         | Brick clay    | 59,4                 | Brick factory closed     |
| <b>Koprivnica-Križevci County</b>       |                     |                            |               |                      |                          |
| 14                                      | Guščerovac          | Radnik d.d.                | Brick clay    | 12                   | Brick factory closed     |
| 15                                      | Ribnjak             | IGMA d.o.o.                | Brick clay    | 3                    | Brick factory closed     |
| <b>Bjelovar-Bilogora County</b>         |                     |                            |               |                      |                          |
| 16                                      | Garešnica           | Finang d.d.                | Brick clay    | 22,55                | Brick factory closed     |
| Excavation sites in Republic of Croatia |                     |                            |               |                      |                          |
| Nb.                                     | Excavation site     | Concession                 | Type of Clay  | Total resources [ha] | Notes                    |
| 17                                      | Dominikovica        | Bilodom d.o.o.             | Brick clay    | 3,35                 | Brick factory closed     |
| 18                                      | Paulovac            | Pavliš d.o.o.              | Brick clay    | 19,88                | Brick factory closed     |
| <b>Virovitica-Podravina County</b>      |                     |                            |               |                      |                          |
| 19                                      | Sladojevci          | Cigлана IGM d.o.o.         | Brick clay    | 12,52                | Brick factory closed     |
| 20                                      | Bilo                | Opeco d.o.o.               | Brick clay    | 6,6                  | Brick factory closed     |
| 21                                      | Orahovica I         | Keramika Modus d.o.o.      | Ceramics clay | no record            | Samples collected        |
| <b>Vukovar-Srijem County</b>            |                     |                            |               |                      |                          |
| 22                                      | Dren                | Dilj d.o.o. Vinkovci       | Brick clay    | 30,88                | Working brick production |
| 23                                      | Slavonka            |                            | Brick clay    | 26,37                | Working brick production |
| 24                                      | Alvaluci            | Razvitak d.d.              | Brick clay    | 15,98                | Brick factory closed     |
| 25                                      | Cerna               | Kvalitet Cerna d.d.        | Brick clay    | 19,16                | Brick factory closed     |
| <b>Osijek-Baranja County</b>            |                     |                            |               |                      |                          |
| 26                                      | Kukljaš             | Dilj d.o.o.                | Brick clay    | 32,5                 | Working brick production |
| 27                                      | Sarvaš              | Opeka d.d.                 | Brick clay    | 44,73                | Brick factory closed     |
| 28                                      | Tomašanci           | Opeka d.d.                 | Brick clay    | 36,83                | Brick factory closed     |
| <b>Karlovac County</b>                  |                     |                            |               |                      |                          |
| 29                                      | Rečica              | Wienerberger d.d.          | Brick clay    | 71,66                | Samples collected        |
| <b>Krapina-Zagorje County</b>           |                     |                            |               |                      |                          |
| 30                                      | Đurđević Brijeg     | Wienerberger d.d.          | Brick clay    | 56,62                | Working brick production |
| <b>Sisak-Moslavina County</b>           |                     |                            |               |                      |                          |
| 31                                      | Donja Čemernica     | Termoterra d.o.o.          | Brick clay    | 55,76                | Samples collected        |
| 32                                      | Brkovec             |                            | Brick clay    | 22,32                | Samples collected        |

Most of the clay samples collected in Croatia so far consist only small portion of kaolinite. As discussed previously, kaolinite shows the highest potential for activation in cementitious materials, compared to illite and montmorillonite [13], which is the result of the difference in the order of its crystalline structure. Some studies [35] suggest even though cements containing other types of activated clays do not show as good results as the ones containing kaolinite, they show a possibility in the usage for lower strength concretes.

Nevertheless, a certain amount of kaolinite should be present in the clay that is used as a SCM to obtain an optimal reasoning for the substitution of cement. If the calcination temperature of clay reaches a value close to the current cement production (1450°C) and has lower reactivity, the production of such blended cement could be considered economically unjustified. For that reason, it is important to establish the reactivity of the blended cement as well as the calcination temperature, which will be the next step in ACT project.

## 5 Concluding remarks and outlook

Usage of clay presents an important part in the development of low CO<sub>2</sub> cementitious materials. Research has shown calcined clays can possess pozzolanic properties, depending of their mineralogical composition. Kaolinite has proven to have the highest pozzolanic activity, compared to illite and montmorillonite, independent on the calcination temperature. The low reactive clays have shown good results in the degree of hydration, which could potentially be enough for low strength concrete. Croatia and South-Eastern European region are considered to be rich in clay materials. Even though certain samples of clay from Croatia were already collected within Swiss-Croatian collaborative project ACT, up to now performed characterisation indicates that they contain only small amount of kaolinite. The aim in the forthcoming period of project ACT will be to locate other sources of clays in Croatia and the region, as well as to optimise the calcination temperature which yields maximum reactivity of chosen clays. Additionally, more research should be dedicated to the life cycle analysis of the production of calcined clay concrete, to validate suitability of locally available calcined clay for production of low CO<sub>2</sub> cementitious materials.

## Acknowledgement

The presented research is a part of a scientific project “Advanced low CO<sub>2</sub> cementitious materials” - ACT, that is financed within the Croatian-Swiss Research Program of the Croatian Science Foundation and the Swiss National Science Foundation with funds obtained from the Swiss-Croatian Cooperation Programme.



## Literature

- [1] E. M. Gartner and D. E. MacPhee, "A physico-chemical basis for novel cementitious binders," *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 7, pp. 736-749, 2011.
- [2] R. Snellings, "Assessing, Understanding and Unlocking Supplementary Cementitious Materials," *RILEM Tech. Lett.*, vol. 1, pp. 50-55, 2016.
- [3] F. Schorcht, I. Kourti, B. M. Scalet, S. Roudier, and L. Delgado Sancho, "Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide," Luxembourg, 2013.
- [4] K. L. Scrivener and A. Nonat, "Hydration of cementitious materials, present and future," *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 7, pp. 651-665, 2011.
- [5] K. Celik, C. Meral, M. Mancio, P. K. Mehta, and P. J. M. Monteiro, "A comparative study of self-consolidating concretes incorporating high-volume natural pozzolan or high-volume fly ash," *Constr. Build. Mater.*, vol. 67, pp. 14-19, 2014.
- [6] J. M. Manso, M. Losañez, J. A. Polanco, and J. J. Gonzalez, "Ladle Furnace Slag in Construction," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 17, no. 5, pp. 513-518, 2005.
- [7] R. T. Thorstensen and P. Fidjestol, "Inconsistencies in the pozzolanic strength activity index (SAI) for silica fume according to EN and ASTM," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 48, no. 12, pp. 3979-3990, 2015.
- [8] M. Schneider, M. Romer, M. Tschudin, and H. Bolio, "Sustainable cement production-present and future," *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 7, pp. 642-650, 2011.
- [9] S. Guggenheim et al., "Definition of clay and clay mineral: Joint report of the AIPEA nomenclature and CMS nomenclature committees," *Clays Clay Miner.*, vol. 43, no. 2, pp. 255-256, 1995.
- [10] A. Ito and R. Wagai, "Data Descriptor : Global distribution of clay-size minerals on land surface for biogeochemical and climatological studies," pp. 1-11, 2017.
- [11] F. Bergaya, B. K. G. Theng, and G. Lagaly, *Handbook of clay science*. Elsevier, 2006.
- [12] K. Mitchell, J. K. Soga, "Chapter 3 Soil Mineralogy," in *Fundamentals of Soil Behavior*, 3rd ed., Hoboken: John Wiley & Sons, 2005, pp. 35-82.
- [13] R. Fernandez, F. Martirena, and K. L. Scrivener, "The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite," *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 1, pp. 113-122, Jan. 2011.
- [14] R. E. Grim, *Applied Clay Mineralogy*, Fifth. New York: McGraw Hill Text, 1962.
- [15] R. S. Varma, "Clay and clay-supported reagents in organic synthesis," *Tetrahedron*, vol. 58, no. 7, pp. 1235-1255, 2002.

- [16] J. K. Mitchell and K. Soga, *Fundamentals of soil behavior*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.
- [17] American Society for Testing and Materials ASTM Standard C125, "Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregate," ASTM International. pp. 1-6, 2010.
- [18] M. Fitos, E. G. Badogiannis, S. G. Tsvilis, and M. Perraki, "Pozzolanic activity of thermally and mechanically treated kaolins of hydrothermal origin," *Appl. Clay Sci.*, vol. 116-117, pp. 182-192, 2015.
- [19] B. Ilić, V. Radonjanin, M. Malešev, M. Zdujić, and A. Mitrović, "Effects of mechanical and thermal activation on pozzolanic activity of kaolin containing mica," *Appl. Clay Sci.*, vol. 123, pp. 173-181, 2016.
- [20] C. Vizcayno, R. M. de Gutiérrez, R. Castello, E. Rodriguez, and C. E. Guerrero, "Pozzolan obtained by mechanochemical and thermal treatments of kaolin," *Appl. Clay Sci.*, vol. 49, no. 4, pp. 405-413, 2010.
- [21] T. Jiang, G. Li, G. Qiu, X. Fan, and Z. Huang, "Thermal activation and alkali dissolution of silicon from illite," *Appl. Clay Sci.*, vol. 40, no. 1-4, pp. 81-89, 2008.
- [22] C. Belver, M. A. Bañares Muñoz, and M. A. Vicente, "Chemical activation of a kaolinite under acid and alkaline conditions," *Chem. Mater.*, vol. 14, no. 5, pp. 2033-2043, 2002.
- [23] C. Shi, "An overview on the activation of reactivity of natural pozzolans," *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 28, no. 5, pp. 778-786, 2011.
- [24] R. L. Day, "Pozzolans for use in low-cost housing. A state of the art report," p. 164, 1990.
- [25] A. K. Chatterjee, "Pozzolanicity of Calcined Clay," Springer, Dordrecht, 2015, pp. 83-89.
- [26] K. L. Scrivener, T. Füllmann, E. Gallucci, G. Walenta, and E. Bermejo, "Quantitative study of Portland cement hydration by X-ray diffraction/Rietveld analysis and independent methods," *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 9, pp. 1541-1547, 2004.
- [27] R. Fernandez and K. Scrivener, "Calcined clayey soils as a potential replacement for cement in developing countries. Ph.D Thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne," 2009.
- [28] J. Crnički and B. Šinkovec, "Nemetalne Mineralne Sirovine Hrvatske," *Rud. Zb.*, vol. 5, no. 1, pp. 21-37, 1993.
- [29] Ž. Dedić et al., "Rudarsko-geološka studija Krapinsko-zagorske županije," Zagreb, 2014.
- [30] B. Kruk et al., "Rudarsko-geološka studija sisačko-moslavačke županije," Zagreb, 2016.
- [31] Ž. Dedić, B. Kruk, L. Kruk, and E. Kovačević-Galović, "Rudarsko-Geološka Studija Varaždinske županije," Zagreb, 2015.

- [32] Z. Peh, "Karta mineralnih sirovina RH." [Online]. Available: <https://www.hgi-cgs.hr/karta-mineralnih-sirovina-RH.htm>.
- [33] A. Grizelj, Z. Peh, D. Tibljaš, M. Kovačić, and T. Kurečić, "Mineralogical and geochemical characteristics of Miocene pelitic sedimentary rocks from the south-western part of the Pannonian Basin System (Croatia): Implications for provenance studies," *Geosci. Front.*, vol. 8, no. 1, pp. 65-80, 2017.
- [34] I. Kovačević, "Eksploatacija i upotreba ciglarske gline u Republici Hrvatskoj," University of Zagreb, 2015.
- [35] M. Murat, "Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals.," *Cem. Concr. Res.*, vol. 13, no. 4, pp. 511-518, Jul. 1983.

# Chloride-induced corrosion of steel embedded in alkali-activated materials: state of the art

**Antonino Runci<sup>1</sup>**, doc.dr.sc. **Marijana Serdar<sup>2</sup>**, prof.dr.sc. **John Provis<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Department of Materials, Croatia, arunci@grad.hr

<sup>2</sup>University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Department of Materials, Croatia, mserdar@grad.hr

<sup>3</sup>University of Sheffield, Department of Materials Science and Engineering, UK, j.provis@sheffield.ac.uk

## Abstract

Alkali-activated materials are a group of alternative binders based on aluminosilicate precursor and an alkali activator. Since precursors are mostly waste materials and by-products, AAMs are considered to be a valid and more environmental-friendly alternative to Portland cement. Although the AAMs show good performance, there are not enough studies in the literature about their long-term durability performance related to chloride ingress and embedded steel corrosion. The issue of this paper is to highlight the main difference between OPC and the different types of AAMs, and to give a short introduction about the state of art of this embedded steel corrosion.

*Key words: alkali-activated material, review, durability, steel corrosion, chloride ingress, chloride binding capacity*

## Korozija čelika u alkalno-aktiviranim materijalima uzrokovana kloridima: pregled stanja područja

### Sažetak

Materijali aktivirani alkalijama su skupina alternativnih veziva na bazi aluminosilikatnog prekursora i alkalnog aktivatora. Oni bi u budućnosti mogli biti zastupljeni kao valjana i ekološki prihvatljiva alternativa portland cementu. Osim što su AAM pokazali dobre rezultate, u literaturi nema dovoljno studija o dugotrajnoj izvedbi klorida i ugrađene korozije čelika. Problem ovog rada je osvijetliti glavnu razliku između OPC-a i različitih tipova AAM-ova i dati kratak uvod o stanju ove ugrađene korozije čelika.

*Ključne riječi: alkalijski aktivirani materijal, pregled, trajnost, korozija čelika, prodor klorida, sposobnost vezanja klorida*

## 1 Introduction

Alkali-Activated Material (AAM) is a general name used to indicate a group of alternative binders, obtained by the reaction between an aluminosilicate source, usually an industrial by-product such as slag from iron and steel production, coal fly ash from thermoelectric plants, among others, and an alkali activator which is usually a concentrated aqueous solution of alkali hydroxide, silicate, carbonate or sulfate [1-3]. Since AAMs are based on industrial byproducts and waste materials, they are considered to reduce the CO<sub>2</sub> emission coming from the cement clinkerisation process, and also divert industrial byproducts from landfilling. Another important advantage to use byproducts is the preservation of natural materials which are normally used in production of Portland cement clinker. It is for these reasons that AAM have received a lot of interest from the scientific community as one of the options when considering more sustainable alternatives to ordinary Portland Cement (OPC).

The AAMs can be distinguished into two different categories based on the final phase assemblage [1-5]:

- Low Ca systems – based on the activation of a precursor with low Ca content, such as fly ash or metakaolin, where the main reaction product is a three-dimensional alkali-aluminosilicate hydrate (N-A-S-H) type gel;
- High Ca systems – based on the activation of a precursor with high Ca content, such as slag, where the main reaction product is calcium-aluminosilicate hydrate (C-A-S-H) type gel.

The AAMs show many engineering characteristics comparable to OPC, and published studies report higher stability when exposed to elevated temperature [6], higher resistance against chemical attack [7-9] and potentially better resistance to freeze-thaw cycles [10, 11], all compared to OPC. However, being a comparatively young engineering material, the quantity of available durability data is limited, and the long-term performance of structures made with AAMs is yet to be determined. Available knowledge on degradation mechanisms from OPC cannot be directly transferred to alkali-activated systems, due to the difference in reaction products, pore solution chemistry, and microstructure of the matrix. Additionally, what makes it more challenging is that any generalization in the case of AAMs is practically impossible since all the parameters of the system differ for each AAM, depending on the type and chemistry of precursor material and the type and amounts of activators used [1,4,5,11]. Among the degradation mechanisms that seek attention is the de-passivation of steel reinforcement embedded in alkali-activated concrete.

The most common causes of reinforcement corrosion are localized de-passivation of the steel surface due to chloride ingress, and/or more general de-passivation due

to acidification of the pore solution as a result of carbonation of the cement paste [13]. In either of the two cases, behaviour of steel when embedded in concrete can be divided into three phases:

- passivation phase – during which passive film is formed on the surface of the steel,
- activation phase or corrosion initiation - during which passive film loses the stability and finally breaks down, and
- degradation phase or corrosion propagation - during which corrosion products start to precipitate on the surface of the steel, leading to concrete cracking.

In all of these three phases chemical and physical properties of concrete surrounding the steel play a crucial role. It can therefore be expected that once steel is embedded in AAM, all three phases will occur with some particularities as compared to OPC.

## 2 Passivation phase – Formation of passive film

The passive film is the external layer formed on the surface of reinforcing steel after contact with an alkaline environment, like cement. It is a protective film formed at the beginning of the embedding of steel, but the quality and the stability of that film depend on the exposure duration and the chemical composition of the passivating solution. In a classical OPC system in which black steel reinforcement is embedded, the passive film has a bi-layer structure:

- inner layer Fe<sup>2+</sup>-rich layer oxy-hydroxide (1-3 nm)
- outer layer Fe<sup>3+</sup>-rich hydroxide film (5-10 nm) [17].

The behaviour of steel in AAMs is more complex because the passivation process is regulated by the redox potential of the steel and oxygen availability, pH and chemistry of the surrounding environment: the different precursor material and activator of AAM change this equilibrium. The most important factor that affects the stability of passive film is the pH and, consequently, the chemical composition of pore solution. The pore solution of a system is a function of the composition of the blend; for that reason, the chemical characteristics of SCMs (Supplementary Cement Material) (i.e. chloride binding capacity, alkalinity) significantly affect the corrosion rates of steel in concrete.

### 2.1 pH value

The pH is the main factor influencing the stability of the passive film on the steel. Gouda et al. [22] found that using different NaOH and Ca(OH)<sub>2</sub> in solutions with different pH the passive film is stable until pH 12.1-11.75. The leaching of OH<sup>-</sup> from

AAS and, probably, also the accelerated carbonation could reduce the pH of AAS faster than OPC [24]. Shi et al. [25] showed that AAS has a higher pH at early ages, but after one year of exposure to chloride environment pH value decreases faster than in the case of OPC. Similar was observed in the study by Ma et al. [27]. The pH value decreased sharply near the surface zone of AAS due to the outward diffusion from AAS into the chloride solution. In OPC,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  would dissolve in the pore solution to buffer its alkalinity; this explains the reason for a constant pH value in the OPC concrete at different depths. However,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  is not one of the reaction products of AAS, and for that reason the loss of alkalinity is more severe in the case of the AAS concretes, particularly in the near surface zone, as can be seen in Figure 1.

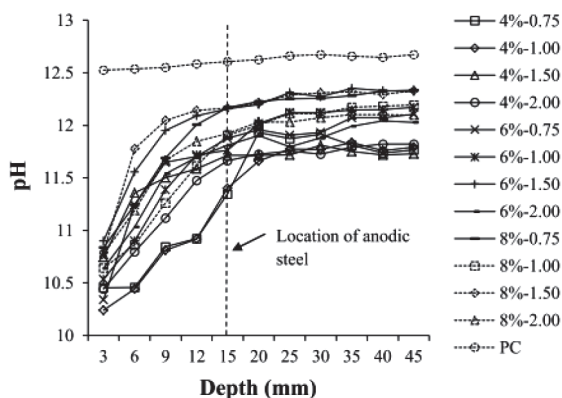


Figure 1. pH profiles determined at the end of the chloride ponding exposure regime [27]

The hydroxyl ion concentration of OPC is typically in the range of 0.53 M to 0.71 M. Scott and Alexander [20] showed the changing concentration of  $\text{OH}^-$  for AAMs blends and OPC after 90 days of maturation; in the system based on OPC it increases by 2.5-2.8 times, the blends contained fly ash, silica fume or slag show a more constant value or a decrease that is approximately 5 times lower than OPC. This reduction in  $\text{OH}^-$  concentration inhibits the capacity of the systems to preserve the stability of the passive film on the steel surface. Babae and Castel [28] displayed that pH of AAM is lower than OPC; pH value of AAM was around 11.5 at the level of the reinforcing bar compared to the widely accepted pH of about 12.5 for uncarbonated OPC.

## 2.2 Sulfide content

It is not only the pH value of the solution that has the paramount influence on the stability of the passive film, it is also the chemical composition of pore solution [23].

In the case of low-Ca systems, Mundra et al. [14] showed that despite the different chemical composition of precursor materials, this system has a broadly similar passivation process to that of OPC systems. However, the high-Ca systems based on blast furnace slag, or the high-volume blends of slag with Portland cement, can still have a conventional passivation process or show a different behavior mostly due to the sulfide content in the slag. The general range of sulfide concentrations in pore solutions for slag replacement levels up to 90 % in PC blends appear to be in the range of 110 to 300 mg/l in addition to thiosulfate ( $S_2O_3^{2-}$ ), found by Glasser et al. [21], and these concentrations are similar in AAS cements [12]. At the beginning the sulfides are oxidised to sulfate by the oxygen available in the system, thus depleting the oxygen concentration at the steel, creating a reducing environment and leading to a more negative value of corrosion potential [18, 35], as seen in Figure 2 a). The reducing environment would favor the formation of Fe(II) rather than Fe(III), which forms the  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  responsible for passivation [20]. Instead of an iron oxide passive film, the precipitation of mackinawite ( $Fe_{1+x}S$ ) on the steel surface occurs [19, 24]. According to this the passivation process would be inhibited. Still some studies have shown that corrosion rate generally decreased with the increase of the concentration of sulfide due to the reducing environment provided by sulfide, Figure 2 b) [27]. Since the steel is embedded in an alkaline solution devoid of oxygen, this absence at the steel surface inhibits the cathodic reaction and the corrosion is controlled [26].

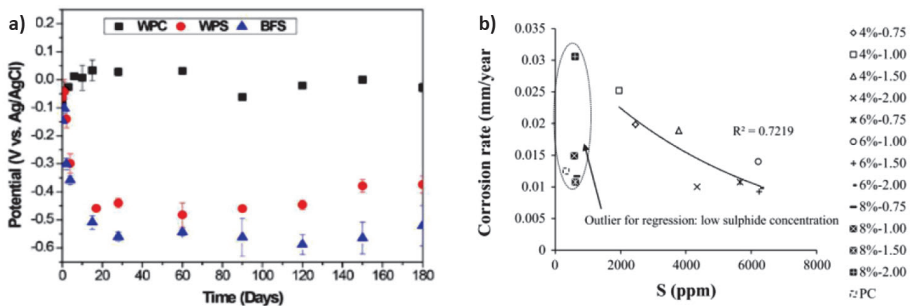


Figure 2. a) Evolution of the potential values as a function of time, for steel embedded in AAS (BFS), OPC + slag (WPS) and Portland cement (WPC) mortars immersed in water [35], and b) Relationship between the corrosion rate and the sulphide concentration [27]



### 3 Activation phase – Corrosion initiation

The steel surface works as a mixed electrode composed of anodes and cathodes electrically connected through the body of the steel itself, upon which coupled anodic and cathodic reactions take place. Concrete pore water functions as an aqueous medium, i.e. a complex electrolyte [13, 29]. The anodic reaction is an oxidation process that depends on the pH and the presence of aggressive anions, such as  $\text{Cl}^-$ . The cathodic reaction is a reduction process that depends on the  $\text{O}^{2-}$  availability and the pH [13]. There are numerous parameters affecting time of corrosion initiation and hereafter only two main influences (critical chloride content and chloride binding) will be considered in detail.

#### 3.1 Critical chloride content

The presence of chloride ions will contribute to the breakdown of the passive layer, while other anions such as  $\text{OH}^-$  are responsible for its stability and have inhibiting properties. There is believed to be a point at which the concentration of aggressive ions overcomes the inhibiting ions and 'corrosion' can initiate, and this is called the critical chloride content ( $C_{\text{crit}}$ ) [15].

Babae and Castel [31] analysed in depth the  $\text{Cl}^-$  threshold value for different AAM. According to the authors the  $C_{\text{crit}}$  of AAM based on fly ash is 0.19-0.69 (% by binder mass), compared to the 0.2-0.4 % by mass of binder for OPC reinforced concrete [16]. For slag-dominated samples, when increasing slag content the  $C_{\text{crit}}$  decreases independently of the alkali content or the sodium silicate activator modulus, which is indicating a less-developed passive film in these binders that can be broken down comparatively easily. The lower stability of the passive layer can be attributed to the oxidation of sulfide anions, which was explained in previous chapter. The AAMs with higher alkaline activator have higher chloride thresholds due to a better dissolution of the precursors that generated a more homogeneous binder. As a result, a less permeable passive layer formed around the bars which took longer to break down. Another influential factor could be the presence of more  $\text{OH}^-$  ions that reacted with the iron cations to form the iron hydroxide layer around the bars [31].

#### 3.2 Chloride binding capacity

The value of total chlorides does not always coincide with the free chloride ( $\text{Cl}^-$  in pore solution) because during the corrosion process the chloride can move through the pore solution or/and bind with the hydration products of the system; it is simultaneously present in the pore solution and in the cement matrix. The amount of bound chloride depends on the percentage chloride binding capacity ( $P_{\text{cb}}$ ) of the system.

In OPC, the Cl may be bounded through physical bonds or chemical bonds. The first bond depends on the amount C-S-H, amount of activator, w/b ratio and amount of aggregates and can be released into the pore solution on diluted conditions. The second one depends on the amount of  $C_3A$  and  $C_4AF$  from which are formed the Friedel's salt ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ ) and other AFm phases. The AAMs show different behavior due the chemical and mineralogical compositions. The absence of  $C_3A$  and  $C_4AF$  hinder generally the precipitation of Friedel's salt [31, 26], but chloride could bind in the AFms and other layered phases that do form [32]. According to Ke et al. [32] hydrotalcite-like (Mg-Al) phases and strätlingite (AFm structure) can take up chloride from highly alkaline solutions with different initial  $[Cl^-]/[OH^-]$  ratios. In hydrotalcite-like phases the  $Cl^-$  is mainly adsorbed ( $\sim 90\%$ ) and the amountion-exchanged is just 10 %, while the strätlingite has less dominant surface adsorption, and lattice substitution of chloride also takes place [31, 32]. Khan and Kayali [33] demonstrated that the blast furnace slag influences more than OPC the binding capacity: increasing the amount of slag the free chloride content is reduced and  $P_{cb}$  increased, this suggests that the  $Cl^-$  bound in AFm or hydrotalcite is higher than absorbed in C-S-H. Maes et al. [30] explained that increasing the amount of slag in an OPC blend the Friedel's salt formation increases because it is linked to the  $Al_2O_3$  content. The chloride binding ability gradually decreases with increasing the quantity of sulfate in blended systems because  $SO_4^{2-}$  has high affinity for the inter-layer of hydrotalcite, more than  $Cl^-$ .

In low-Ca AAM systems, the N-A-S-H favors more the adsorption of  $Cl^-$  than C-(A)-S-H. Alkali binding increases as calcium content decreases with fly ash addition, hence reducing the alkalinity in the pore solution. High alkali binding capacity is also attributed to the surface charge of the N-A-S-H, which attracts more ions from the surrounding pore solution [29, 27]. Lee and Lee [34] found a correlation between the aluminosilicate gel and the chloride-binding capacity in AAMs; increasing the aluminosilicate gel with the depth, the  $P_{cb}$  increases; therefore, the increase of bounded Cl with the depth is linked with the aluminosilicate gel content in AAMs; the chloride-binding capacity increases with an increase in the fly ash content and with a decrease in the slag content because the addition of fly ash results in greater physical absorption of chloride compared to the C-(A)-S-H gel due to the higher surface area of the aluminosilicate gel in the alkali-activated fly ash, Figure 3.a) The NaOH concentration has an important role during the chloride binding because more chloride ions were bound in geopolymer with higher NaOH concentration than with lower NaOH concentration because the physical binding of chloride ions increases due the greater geo-polymerisation, Figure 3 b) [29].

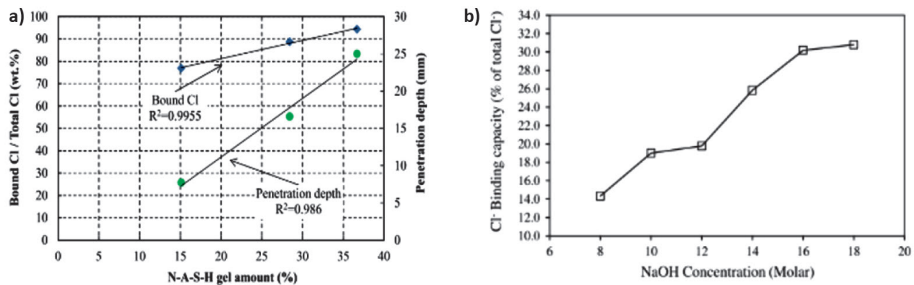


Figure 3. a) Bound chloride-to-total chloride ratio ( %) and penetration depth (mm) over the N-A-S-H gel amount ( %) in alkali-activated fly ash-slag samples [34]; and b) The effect of sodium hydroxide (NaOH) concentration on chloride binding capacity of fly ash-based AAM concrete [29]

## 4 Conclusion

The alkali-activated material systems have different chemical and mineralogical composition compared to OPC, which strongly influences all phases of corrosion process. In the case of low-Ca AAM, the higher amount of N-A-S-H gel rather than C-S-H favors chloride adsorption, but the absence of  $C_3A$  and  $C_4AF$  hinder the formation of AFm phases that can give chemical binding. In the case of high-Ca AAM, such as AAS systems, a high content of sulfide generates reductive environment in which thinner and potentially less durable passive film is preferentially formed. In such systems, the main reaction product is C-A-S-H, and the high Ca and Al contents favor the AFm precipitation and the chemical chloride binding. Although both types of AAMs showed binding of chlorides, the main difference is in the gel phases. The finer structure of C-A-S-H reduces the chloride penetration but also the physical binding, while the porous structure of N-A-S-H increases the penetration and the adsorption of chlorides.

The different chemical composition of AAMs makes it difficult to use the OPC standards as a reference. The variability is high for each type of system and depends on the type of precursor and the specific blends made. Establishing and validating durability and corrosion testing methods for alkali-activated concretes remains the major obstacle to their commercial adoption in demanding structural applications, and ultimately their acceptance in national and international regulatory standards for structural concrete. Finally, even though AAM attract a lot of attention due to the potential  $CO_2$  saving, calculations on  $CO_2$  emissions are more complex than merely considering the volume of byproducts substituting cement. Some of the materials used as precursors must be milled which also consumes a lot of energy and emits some  $CO_2$ . Additional challenge lays in the fact that most of these materials are cur-

rently considered as waste, which makes their transport and industrial application difficult. The properties and use of these materials in the future must be regulated by international standard, such as EN 450 for fly ash.

## Acknowledgment

This inceptive study was financially supported by DuRSAAM project (<http://www.dursaam.ugent.be/>).

## Literature

- [1] Provis J.L., Geopolymers and other alkali activated materials: Why, how, and what? *Materials and Structures* 47: 11–25 (2014).
- [2] Provis J.L., van Deventer J.S.J., Alkali-activated materials: State-of-the-Art Report, RILEM TC 224-AAM. Springer/RILEM, Berlin (2014).
- [3] Provis J.L., Palomo A., Shi C., Advances in understanding alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research* 78:110-125 (2015).
- [4] Li C., Sun H., Li L., A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements. *Cem Concr Res.* 40: 1341–1349 (2010).
- [5] Mundra S., Bernal Lopez S., Criado M., Hlaváček P., Ebell G., Reinemann S., Gluth G., Provis J.L., Steel corrosion in reinforced alkali-activated materials. *RILEM Technical Letters*, 2: 33-39 (2017).
- [6] Kupwade-Patil K., Soto F., Kunjumon A., Allouche E.N., Mainardi D.S., Multi-scale modeling and experimental investigations of geopolymeric gels at elevated temperatures, *Comput. Struct.* 122: 164-277 (2013).
- [7] Fernandez-Jimenez A., García-Lodeiro I., Palomo A., Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials, *J. Mater. Sci.* 42:3055–3065 (2006).
- [8] Bakharev T., Resistance of geopolymer materials to acid attack, *Cem. Concr. Res.* 35: 658–670 (2005).
- [9] Bakharev T., Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions, *Cem. Concr. Res.* 35: 1233–1246 (2005).
- [10] Fu Y., Cai L., Wu Y., Freeze–thaw cycle test and damage mechanics models of alkali-activated slag concrete, *Constr. Build. Mater.* 25: 3144–3148 25 (2011).
- [11] Zhang Y., Sun W., Fly ash based geopolymer concrete, *Indian Concr. J.* 80: 20–24 (2006).
- [12] Gruskovnjak A., Lothenbach B., Winnefeld F., Figi R., Ko S.-C., Adler M., Mäder U., Hydration mechanisms of super sulphated slag cement, *Cement and Concrete Research* 38: 983–992 (2008).

- [13] Shamsad A, Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction—a review, *Cem Concr. Compos.*, 24: 459-471 (2003).
- [14] Mundra S., Criado M., Bernal S.A., Provis J.L., Chloride-induced corrosion of steel rebars in simulated pore solutions of alkali-activated concretes, *Cem. Con. Res.*, volume 100:385-397 (2017).
- [15] Angst U, Elsener B., Larsen C.K., Vennesland, Ø., Critical chloride content in reinforced concrete — A review, *Cement and Concrete Research* 39, 1122-1138 (2009).
- [16] European Standard EN 206, Concrete — Part 1: Specification, Performance, Production and Conformity, European Committee for Standardisation, 2011.
- [17] Angst U., Geiker A., Mette R., Michel A., Gehlen C., Wong H., Isgor O., Elsener B., Hansson C.M., François R., Hornbostel K., Polder R., Alonso M.C., Sanchez M., Correia M.J., Criado M., Sagüés A., Buenfeld N., The steel–concrete interface, *Materials and Structures* 50: 143 (2017).
- [18] Scott A., Alexander M.G., Effect of supplementary cementitious materials (binder type) on the pore solution chemistry and the corrosion of steel in alkaline environments. *Cem. Concr. Res.* 89: 45–55 (2016).
- [19] Shoesmith D.W., Bailey M.G., Ikeda B., Electrochemical formation of mackinawite in alkaline sulphide solutions. *Electrochim Acta* 23: 1329–1339 (1978).
- [20] Scott A., Alexander M.G., Effect of supplementary cementitious materials (binder type) on the pore solution chemistry and the corrosion of steel in alkaline environments, *Cement and Concrete Research* 89: 45-55 (2016).
- [21] Glasser F., Luke K., Angus M., Modification of cement pore fluid compositions by pozzolanic additives, *Cement and Concrete Research* 18: 165–178 (1988).
- [22] Gouda V., Corrosion and corrosion inhibition of reinforcing steel I: immersed in alkaline solutions, *British Corrosion Journal* 5 198–203(1970).
- [23] Ghods P., Isgor O.B., McRae G., Miller T., The effect of concrete pore solution composition on the quality of passive oxide film on black steel reinforcement, *Cement and Concrete Composites* 31: 2–11(2009).
- [24] Monticelli C., Natali M., Balbo A., Chiavari C., Zanotto F., Manzi S., Bignozzi M., A study on the corrosion of reinforcing bars in alkali-activated fly ash mortars under wet and dry exposures to chloride solutions, *Cement and Concrete Research* 87: 53–63 (2016).
- [25] Shi J., Ming J., Sun W., Electrochemical behaviour of a novel alloy steel in alkali-activated slag mortars, *Cement and Concrete Composites* 92: 110–124 (2018).
- [26] Ismail I., Bernal S.A., Provis J.L., San Nicolas R., Brice D.G., Kilcullen A.R., Hamdan S., van Deventer J.S.J., Influence of fly ash on the water and chloride permeability of alkali-activated slag mortars and concretes, *Construction and Building Materials* 48: 1187–1201 (2013).

- [27] Ma Q., Nanukuttan S.V., Basheer P.A.M., Bai Y., Yang C., Chloride transport and the resulting corrosion of steel bars in alkali activated slag concretes. *Mater. Struct.* 49, 3663–3677 (2016).
- [28] Babaee M., Castel A., Chloride-induced corrosion of reinforcement in low-calcium fly ash-based geopolymer concrete, *Materials and Structures* 49:3663–3677 (2016).
- [29] Chindaprasirt P., Chalee W., Effect of sodium hydroxide concentration on chloride penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concrete under marine site, *Construction and Building Materials* 63: 303–310(2014).
- [30] Maes M., Gruyaert E., De Belie N., Resistance of concrete with blast-furnace slag against chlorides, investigated by comparing chloride profiles after migration and diffusion, *Materials and Structures* 46:89–103 (2013).
- [31] Babaee M., Castel A., Chloride diffusivity, chloride threshold, and corrosion initiation in reinforced alkali-activated mortars: Role of calcium, alkali, and silicate content, *Cement and Concrete Research* 111: 56-71 (2018).
- [32] Ke X., Bernal S.A., Provis J.L., Uptake of chloride and carbonate by Mg-Al and Ca-Al layered double hydroxides in simulated pore solutions of alkali-activated slag cement, *Cement and Concrete Research* 100: 1-13 (2017).
- [33] Khan M.S.H., Kayali O., Chloride binding ability and the onset corrosion threat on alkali activated GGBFS and binary blend pastes, *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 8: 1023-1039(2018).
- [34] Lee N.K., Lee H.K., Influence of the slag content on the chloride and sulfuric acid resistances of alkali-activated fly ash/slag paste, *Cement and Concrete Composites* 72: 168-179 (2016).
- [35] Criado M., Provis J., Alkali activated slag mortars provide high resistance to chloride-induced corrosion of steel, *Frontiers in Materials* 5, #34 (2018).



# Mogućnost primjene betonskih pragova s elastičnim podloščima na mostovima

Zvonko Perčin<sup>1</sup>, prof.dr.sc. Stjepan Lakušić<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Međimurska 4, 10000 Zagreb, zvonko.percin@prg.hr

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, laki@grad.hr

## Sažetak

Jedan od najosjetljivijih segmenata željezničke infrastrukture svakako su mostovi. Svi čelični rešetkasti mostovi imaju drvene pragove koji su pričvršćeni za konstrukciju mosta te prilikom održavanja gornjega pružnog ustroja ne mogu mijenjati visinu. Prilikom obnove, rekonstrukcije ili zamjene dotrajalih mostova danas je praksa da se kolosiječna rešetka odvaja od konstrukcije mosta. Jedan od načina jest taj da se čelične rešetkaste konstrukcije zamjenjuju armiranobetonskim konstrukcijama u obliku korita ili, ako su rasponi veći, čeličnim konstrukcijama u obliku korita. Standardnu klasičnu kolosiječnu konstrukciju danas čine kolosijeci s betonskim pragovima i zastornom prizmom od tucaničkoga materijala. Takvi kolosijeci imaju smanjenu elastičnost, što je posebno važno na kontaktu praga i zastornoga materijala. Kako bi se smanjili negativni utjecaji vibracija i na taj način produljila trajnost kolosijeka, željezničke uprave sve češće primjenjuju AB pragove s elastičnim podloščima. Ispitivanja su pokazala to da je ugradnjom podložaka moguće postići mirniji prolazak vlaka preko podloga različitih krutosti, čime se smanjuje mogućnost oštećenja kolosiječne konstrukcije i samoga vozila.

*Cljučne riječi: betonski prag, podloške ispod pragova, vibracije, željeznički mostovi*

## Possibility of application of concrete sleepers with under sleeper pads on bridges

### Abstract

One of the most sensitive segments of the railway infrastructure are certainly bridges. All steel grid bridges have wooden sleeper attached to the bridge structure and cannot change the height when maintaining the upper structure rails. It has become a practice to reconstruct or replace damaged bridges in the past by taking care that the track construction is separated from the bridge constructions. One way is that steel grid structures are replaced with reinforced concrete structures in the form of a trough or if the spans are larger with steel structures in the form of a trough. The standard classical track construction today is a gangway with concrete sleepers and a ballast of crushed stone material. Such tracks have reduced elasticity, which is particularly important at contact between the sleepers and the stone material. In order to reduce the negative impacts of vibration and thus extend the durability of railway track today, railways increasingly apply concrete sleepers with under sleeper pads. Tests have shown that with the installation of the undersleeper pads it is possible to achieve a quieter passage of the train over the substrates of different stiffness, thus reducing the possibility of damage to the track construction and the vehicle itself.

*Key words: concrete sleeper, under sleeper pads, vibration, railway bridges*



## 1 Uvod

Željezničku mrežu Republike Hrvatske čini nešto više od 2600 km pruga. Prema podacima HŽ Infrastrukture, u sklopu željezničke infrastrukture nalazi se 545 kolodvora, 1512 željezničko-cestovnih prijelaza, 109 tunela i 538 mostova. Posljednje novoizgrađene pruge puštene su u promet sedamdesetih godina prošlog stoljeća, što znači da je većina izgrađenih objekata spremna za djelomičnu ili potpunu rekonstrukciju i zamjenu. Osim što je neophodno ulagati u modernizaciju željezničke infrastrukture, potrebno je prilagoditi tehničke uvjete i pravilnike kako bi se otvorio put za uvođenje i održavanje novih proizvoda i modernijih tehnologija. Današnji se promet prugama znatno razlikuje od onoga kada su pruge izgrađene. Najveće su promjene u osovinskome opterećenju i brzini tračničkih vozila. Jedan od najosjetljivijih segmenata željezničke infrastrukture svakako su mostovi. Većina željezničkih mostova na mreži RH su čelične rešetkaste konstrukcije koje su s vremenom ojačavane kako bi zadovoljile prometne potrebe. Kao što se promijenila vrsta prometa na željeznici, tako se promijenio i način održavanja. Danas se održavanje željezničke infrastrukture temelji na što većoj primjeni mehanizacije kako bi se postupak automatizirao, a time i znatno ubrzao. Krajnji razlog jest ušteda s obzirom na to da se postižu kraći zatvori pruge, a time i manji neizravni troškovi koji nastaju zbog zatvora pruge. Za održavanje gornjega pružnog ustroja koriste se strojevi koji održavaju niveletu pruge tako da podbijaju kameni materijal ispod pragova. Rezultat svakoga strojnog podbijanja jest izdizanje nivelete pruge za visinu od nekoliko milimetara do nekoliko centimetara. Svi čelični rešetkasti mostovi imaju drvene pragove koji su fiksirani za mosnu konstrukciju te prilikom održavanja gornjega pružnog ustroja ne mogu mijenjati visinu (slika 1.). Posljedica nemogućnosti promjene visine nivelete na čeličnim rešetkastim mostovima jesu rampe ispred mosta i iza njega, što radi sigurnosti i udobnosti vožnje zahtijeva smanjenje brzine kretanja vlaka u zoni mosta.



Slika 1. Pričvršćivanje drvenih pragova na čeličnu mosnu konstrukciju

Održavanje kolosijeka na samim objektima zahtjevno je jer se radi o drvenim pragovima koji se zasebno obrađuju kako bi se visinski prilagodili mostu i niveleti pruge (slika 2.). Za promjenu mosne građe na objektu od dvadesetak metara kolosijeka potreban je zatvor pruge od gotovo isto toliko sati. U slučaju da zatvor nije kontinuiran, radi demontaže i ponovne montaže kolosijeka taj pothvat traje dulje, što ujedno znači veći trošak.



Slika 2. Pojedinačna obrada drvenih pragova na čeličnome mostu

Zadnjih godina postaje praksa da se prilikom obnova, rekonstrukcija ili zamjena dotrajalih mostova vodi briga o tome da se kolosiječna rešetka odvaja od konstrukcija mosta. Jedan je od načina da se čelične rešetkaste konstrukcije zamjenjuju armiranobetonskim konstrukcijama u obliku korita ili, ako su rasponi veći, čeličnim konstrukcijama u obliku korita (slike 3. i 4.). Na taj se način postiže kontinuitet u visini kolosijeka nakon regulacije geometrije kolosijeka, što znatno utječe na jednostavnost prilikom održavanja gornjega pružnog ustroja i, što je još važnije, s vremenom nema potrebe za smanjivanjem brzine u zoni mosta zbog prijelaznih rampi. Osim promjene u obliku konstrukcije drveni pragovi zamjenjuju se armiranobetonskima.



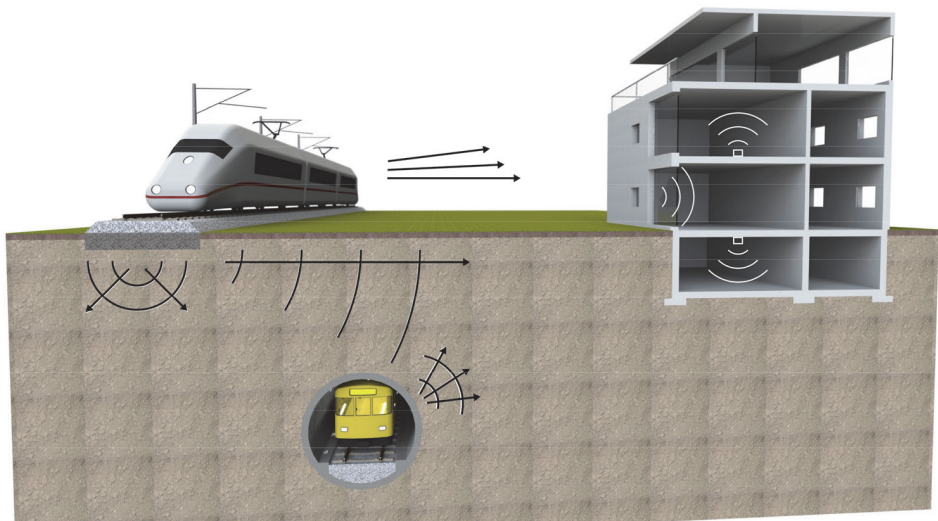
Slika 3. Čelična konstrukcija mosta, faza izvedbe



Slika 4. Armiranobetonska rasponska konstrukcija mosta, faza ugradnje postupkom naguravanja

## 2 Vibracije uzrokovane kretanjem željezničkoga vozila

Prilikom kretanja vozila po tračnicama, odnosno dinamičkoga opterećenja kolosijeka, pojavljuju se vertikalne oscilacije tračnica, koje su još izraženije ako na voznoj površini tračnica ili kotača vozila postoje neravnine. Što su osovinsko opterećenje i brzina veći, izraženiji je i intenzitet vibracija koje se od izvora šire u njegovu okolinu [1]. Pri visokim se frekvencijama energija vibracija širi zrakom u obliku zvučnih valova (buke), dok se vibracije nižih frekvencija prenose u obliku mehaničkih valova preko tračnica na donje dijelove kolosiječne konstrukcije i zatim u okolno tlo [2] (slika 5.).



Slika 5. Širenje vibracija i buke željezničkoga prometa [4]

Modernizacijom željezničke infrastrukture želi se postići veća brzina prometovanja vozila i povećanje nosivosti kolosiječne konstrukcije. Jedan od najčešćih tipova klasičnih kolosiječnih konstrukcija svakako su kolosijeci s betonskim pragovima i zastornom prizmom od tucaničkoga materijala. Takvi kolosijeci u usporedbi s konstrukcijama izvedenima primjenom drvenih pragova imaju veću krutost, što utječe na kontakt praga i zastorne prizme.

Izgradnjom pruga uz primjenu betonskih pragova relativno velike krutosti došlo je do promjena u načinu raspodjele opterećenja u zastornoj prizmi neposredno ispod praga. Općenito, tucanička zastorna prizma najslabija je karika u čitavoj konstrukciji kolosijeka jer tijekom upotrebe, zbog utjecaja dinamičkih sila na kolosijek, dolazi do lateralnih dinamičkih pomaka zrna tucanika odnosno do međusobnoga zbijanja, a time i do degradacije zrna. Izraženija i brža degradacija i raspadanje zrna tucanika posljedica su povećanja brzine kretanja tračničkih vozila i njihovih opterećenja te nedovoljnoga progibanja tračnica i ostalih elemenata zbog povećane ukupne krutosti kolosiječne rešetke [1].

S gledišta održavanja pruga, ubrzano propadanje kolosijeka zahtijeva učestalo redovito održavanje, no željezničke uprave zbog smanjenja sredstava namijenjenih za održavanje pribjegavaju primjeni nepopularnih mjera kako bi se omogućio siguran i udoban tijek prometa, što uključuje uvođenje smanjenja brzine prometovanja vlakova, smanjenje osovinskoga opterećenja, čime se negativno utječe na prijevoznu i propusnu sposobnost pruge, te skraćuje ciklusa redovitoga održavanja geometrije kolosijeka, a time i povećanje troškova održavanja pruge [3].



Kako bi se smanjili negativni utjecaji vibracija i na taj način produljila trajnost kolosijeka, danas se uobičajeno koriste elastični podlošci ispod tračnica i elastični pričvrtni pribor, a sve je češća ugradnja elastičnih prostirki ispod zastorne prizme, koje služe za smanjenje prijenosa vibracija sa zastora na donji pružni ustroj odnosno na temeljno tlo. Nedostaci su takvih prostirki relativno visoka cijena te poteškoće pri ugradnji (otežano zbijanje zastornoga materijala). U posljednje se vrijeme kao alternativno rješenje odnosno kao dodatna mogućnost povećanja elastičnosti kolosiječne konstrukcije istaknula ugradnja podloška od elastičnoga, mekanoga materijala između pragova i zastorne prizme (slika 6.).

### 3 Elastični podlošci ispod pragova

Prvi su put elastični podlošci pričvršćeni za donju površinu praga primijenjeni na prugama pod upravljanjem Švicarskih saveznih željeznica (SBB) 1986. [1]. To se rješenje pokazalo boljim u odnosu na elastične podloške ispod zastorne prizme jer je već u gornjim dijelovima kolosiječne konstrukcije sprječavalo prelazak vibracija na konstrukciju. Osnovna je funkcija podložaka smanjenje učinka nejednolike krutosti kolosijeka na kontaktne sile i povećanje površine preko koje pragovi prenose ta opterećenja na zastornu prizmu.



Slika 6. Elastični podložak ispod betonskoga praga [1]

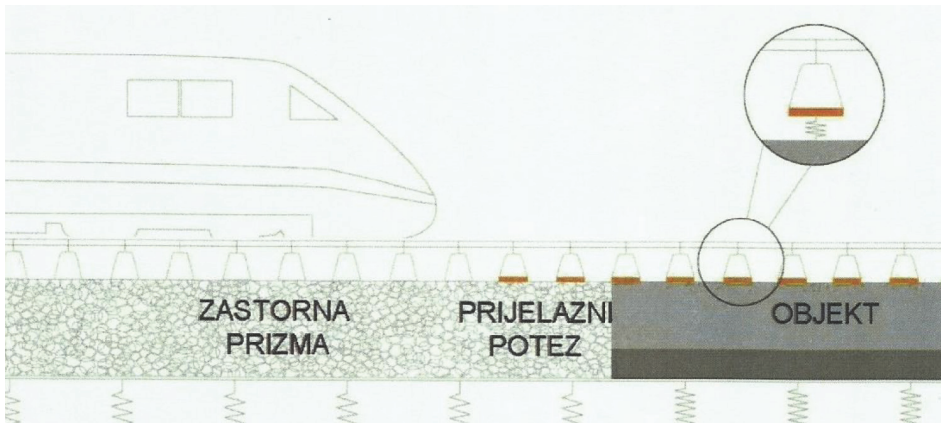
Ugradnjom podložaka smanjuju se rezonantne frekvencije kolosiječne rešetke, a time i prijenos vibracija s rešetke na tucanički materijal zastora i donji pružni ustroj. Također, smanjenjem vibracija koje se prenose između pojedinih zrna tucaničkoga materijala moguće je znatno smanjiti njegovo trošenje, čime se izravno utječe na povećanje perioda održavanja zastora [1]. Austrijske savezne željeznice (ÖBB) su primjenu podložaka ispod pragova propisale kao obvezu za glavne željezničke pravce i u zonama skretnica [4].

### 3.1 Primjena betonskih pragova s elastičnim podloščima u zoni mostova

S obzirom na krutost, postojeći su kolosijeci izgrađeni na nehomogenoj podlozi. Nagle promjene vertikalne krutosti duž pružne trase nastaju:

- u zonama skretnica,
- u zonama krivina malih radijusa,
- na mjestima željezničko-cestovnih prijelaza,
- u zonama mostova ili vijadukta.

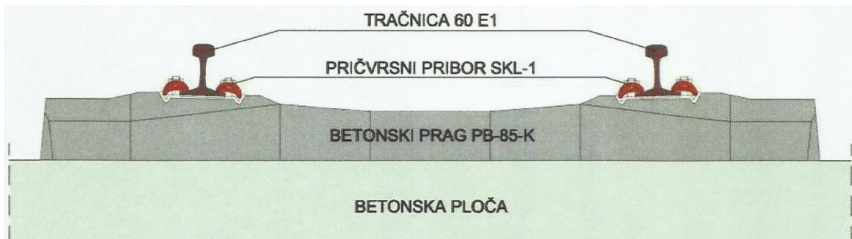
Na tim mjestima stvaraju se znatne dinamičke sile (udari), koje se manifestiraju kao neugodno trzanje vlaka u vožnji i rezultiraju ubrzanim trošenjem zastora ispod pragova [5]. Osim toga smanjuje se vijek trajanja objekata i tračničkoga vozila. Da bi spriječili neželjene posljedice na mostovima, za ublažavanje naglih promjena krutosti podloge koriste se betonski pragovi s podloščima [6]. Ispitivanja su pokazala to da je ugradnjom podložaka na prijelaznoj dionici dovoljne duljine moguće postići mirniji prolazak vlaka preko podloga različitih krutosti, čime se smanjuje mogućnost oštećenja kolosiječne konstrukcije i samoga vozila (slika 7.). Prijelazne dionice u duljini od 20 do 30 metara imaju podloške nešto veće krutosti u odnosu na podloške meke krutosti koji se ugrađuju na samome objektu [1].



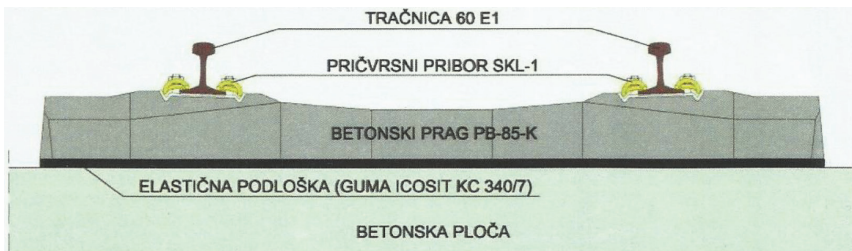
Slika 7. Pogled na prijelazne zone [1]

### 3.2 Ispitivanja krutosti kolosijeka s elastičnim podlošcima ispod AB pragova i bez njih

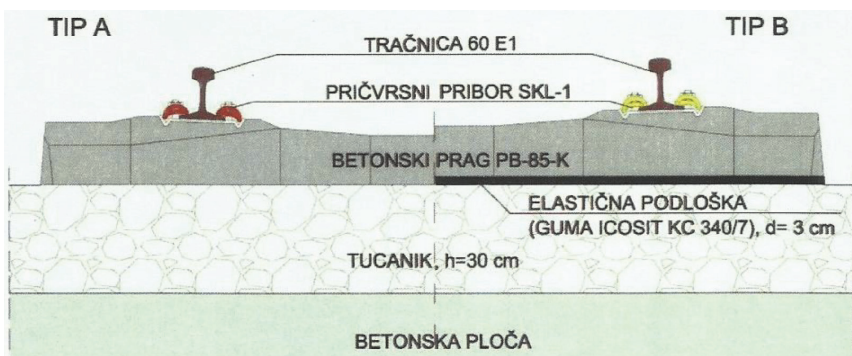
U proteklih desetak godina na Katedri za željeznice pri Građevinskom fakultetu u Zagrebu izvodila su se istraživanja sposobnosti prigušenja vibracija pojedinih komponenti kolosiječne konstrukcije. Za potrebe ispitivanja napravljen je poligon od ploče debljine 30 cm na koju su položene dvije ispitne konstrukcije, od kojih se svaka sastojala od dvije tračnice 60 E1, duljine 1,20 m, pričvršćene elastičnim pričvršnim priborom SKL-1 za dva betonska praga PB-85-K. Na poligonu su se provodila mjerenja vibracija na betonsku podlogu s elastičnim podlošcima i bez njih te mjerenja učinka vibracija na zastorni materijal ispod betonskih pragova s elastičnim podlogama i bez njih (slike 8., 9. i 10.).



Slika 8. Mjerenje vibracija na betonsku podlogu, pragovi bez elastičnih podlošaka [1]



Slika 9. Mjerenje vibracija na betonsku podlogu, pragovi s elastičnim podloškom [1]



Slika 10. Mjerenje utjecaja vibracija na zastorni materijal ispod betonskih pragova, pragovi s elastičnim podlošcima (TIP A) i bez njih (TIP B) [1]

Sva mjerenja pokazala su to da se primjenom elastičnih podložaka znatno smanjuje širenje vibracija na betonsku ploču, odnosno na zastorni materijal. Međutim, rezultati su dobiveni na poligonu gdje su vibracije izazivane utegom, a ne tračničkim vozilom. Sljedeći korak u ispitivanju širenja vibracija trebalo bi napraviti na pokusnoj dionici, gdje bi rezultati dali pravu sliku učinka smanjenja vibracija uz primjenu elastičnog podloška [1]. Osim jednoslojnih elastičnih podložaka ispod pragova provode se ispitivanja na višeslojnim (sendvič) elastičnim podloščima kako bi se povećala njihova učinkovitost. Elastični podložak sastoji se od tri sloja, i to od gornjega sloja u obliku ljepljive mreže koja služi za prijanjanje, srednjega sloja od visokoelastične smjese za prigušenje vibracija i donjega, plastičnog zaštitnog sloja [4].

## 4 Zaključak

Promjenom tipa kolosiječne konstrukcije na objektima (umjesto direktnog oslanjanja pragova na nosače mosta, izvedba kolosiječne konstrukcije sa zastornom prizmom) znatno se olakšava održavanje gornjeg ustroja kolosijeka. Ugradnjom betonskih pragova s podloščima u zoni mostova produljuje se vijek trajanja kolosiječne konstrukcije i samoga objekta, što u konačnici zahtijeva manje troškove održavanja. Ispitivanja provedena na Građevinskom fakultetu u Zagrebu trebala bi pomoći u primjeni takvih tehnologija (elastičnih podložaka ispod betonskih pragova) ne samo u zonama oko mostova, već i na drugim objektima (željezničko-cestovnim prijelazima, skretnicama, tunelima). Pojedine željezničke uprave uočile su određene prednosti takvih kolosiječnih konstrukcija na svojim probnim dionicama i već su započele s njihovom primjenom na duljim potezima pruge. No, primjena nove tehnologije na prugama pod upravljanjem neke željezničke uprave zahtijeva i izgradnju probnih dionica, ispitivanja na kolosijecima te promatranje učinkovitosti primijenjenoga novog rješenja kako bi se usvojilo kao standardno. Zbog ekoloških zahtjeva tržišta sve je manje drvenih pragova koji zbog svoje elastičnosti zadovoljavaju uvjete pruga gdje nema tamponskoga sloja te gdje je manja debljina zastorne prizme (ispod 20 cm). Rezultati dobiveni na poligonu dobar su pokazatelj da treba nastaviti s ispitivanjima na probnoj dionici pod realnim opterećenjem te da treba ispitati mogućnost kompletne zamjene drvenih pragova betonskima s elastičnim podloščima.

Budući da su u planu veća ulaganja u željezničku infrastrukturu, potrebno je uložiti što više napora u obrazovanje projekatanta, proizvođača, izvođača i drugih kako bi se uhvatio korak s već provjerenim proizvodima i uhodanim tehnologijama održavanja željezničke infrastrukture.



## Literatura

- [1] Lakušić, S., Ahac, M.: Betonski pragovi s elastičnim podloščima, DANI PROMETNICA 2010 – Nove tehnologije i materijali (ur. Lakušić, S.), Građevinski fakultet, Zavod za prometnice, pp. 579-615., Zagreb, 2010.
- [2] Lakušić, S., Ahac, M.: Vibracije od željezničkog prometa, DANI PROMETNICA 2009 – Gospodarenja prometnom infrastrukturom (ur. Lakušić, S.), Građevinski fakultet, Zavod za prometnice, pp. 373-416., Zagreb, 2009.
- [3] Pravilnik 314 o održavanju gornjeg stroja pruga jugoslavenskih željeznica, Beograd, 1989
- [4] Loy, H.: Mitigating vibration using under-slipper pads, Railway Gazette International 4/2012, Research and Development Getzner Werkstoffe GmbH
- [5] Le Pen, L., Watson, G., Hudson, A., Powrie, W.: Behaviour of under sleeper pads at switches and crossings – Field measurements, Rail and rapid transit – Institution of mechanical engineers 2018, 232 (2018) 4, pp. 1049-1063, UK
- [6] Insa, R., Salvador, P., Inarejos, J., Medina, L.: Analysis of the performance of under-sleeper pads in high-speed line transition zones, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Paper 1100033, Spain, 2012.

# Primjena armaturnih mreža u asfaltnim slojevima kolnika

Sandra Mihalinač<sup>1</sup>, prof.dr.sc. Tatjana Rukavina<sup>2</sup>, doc.dr.sc. Miroslav Šimun<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Tehničko veleučilište u Zagrebu, Graditeljski odjel, sandra.mihalinač@tvz.hr

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, rukavina@grad.hr

<sup>3</sup>Tehničko veleučilište u Zagrebu, Graditeljski odjel, msimun@tvz.hr

## Sažetak

Asfaltni kolnici izloženi su dinamičkim opterećenjima prometa, velikim temperaturnim oscilacijama koje utječu na ponašanje materijala i pri različitim eksploatacijskim uvjetima uzrokuju pojavu trajnih deformacija u obliku pukotina i kolotraga. Upotrebom odgovarajućih mreža za armiranje produljuje se vijek trajanja slojeva kolničke konstrukcije i smanjuju troškovi održavanja asfaltnih kolnika. Upotrebom armaturnih mreža prilikom sanacija sprječava se rizik od reflektiranja strukturnih pukotina iz donjih slojeva u gornje slojeve kolničke konstrukcije, a sve to zahtijeva pouzdanije zahvate na kolniku i troškovno isplativije načine održavanja cesta.

*Ključne riječi: asfaltni kolnik, deformacije, strukturne pukotine, kolotraženje, armaturna mreža*

## Grids application in asphalt pavement layers

### Abstract

Asphalt pavements are exposed to dynamic loads of traffic, high fluctuations in temperature affecting the behaviour of the material and at various exploitation conditions cause permanent deformations in the form of cracks and ruts. Using adequate grids increases the lifetime of the pavement layers and thus reduces maintenance costs. Using grids by rehabilitation, it avoids the risk of reflecting structural cracks from the lower layers into the upper layers of the pavement, requiring more reliable pavement operations and cost-effective road maintenance.

*Key words: asphalt pavement, deformations, structural cracks, rutting, grid*

## 1 Uvod

Prometna infrastruktura ključna je za ekonomske i društvene pokazatelje nekoga geografskog područja. Kvaliteta asfaltnih kolnika ima izravan utjecaj na mobilnost stanovništva i prijevoz robe. Zbog kontinuiranoga rasta broja vozila i povećanja osovinskoga opterećenja dolazi do toga da pojedini slojevi kolničkih konstrukcija brže propadaju. Prema Statističkom godišnjaku Cestovne federacije Europske unije (ERF) iz 2017., u Europskoj uniji postoji više od 4,8 milijuna kilometara cesta s asfaltnim zastorom [1] koje je potrebno održavati na odgovarajući način.

Asfaltni slojevi kolnika moraju biti stabilni i postojani, otporni na deformacije, posebno onih plastičnih pri višim temperaturama, otporni na niske temperature, na djelovanje prometa, hrapavi i hvatljivi te ekonomični s gledišta mogućnosti nabave i kvalitete upotrijebljenih materijala.

Tijekom eksploatacije zbog sve većega porasta opsega cestovnog prometa dolazi do postupne degradacije kolničke konstrukcije, ponajprije do oštećenja asfaltnih slojeva u obliku pukotina, kolotraga, ulegnuća i sličnog. Te se pojave pripisuju ponajprije djelovanju prometnoga opterećenja kao i temperaturnim naprezanjima koja su posljedica širenja i skupljanja.

Pukotine smanjuju strukturnu stabilnost kolnika i omogućuju prodiranje vode u slojeve kolničke konstrukcije, što rezultira bržim propadanjem kolnika.

Upravo su mreže za armiranje asfalta jedno od rješenja prilikom izgradnje novih kolničkih konstrukcija, ali i prilikom sanacije već postojećih kolničkih konstrukcija koje ispunjavaju navedene zahtjeve [2-16]. Upotrebom mreža za armiranje asfalta poboljšava se ponašanje asfaltnih slojeva, ali i kolničke konstrukcije u cjelini.

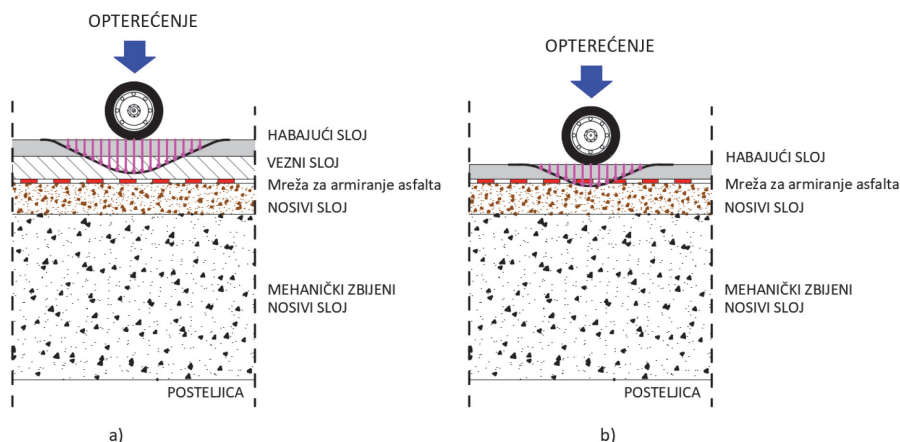
## 2 Mreže za armiranje asfalta

Pojačanje kolnika armaturnim mrežama započelo je 60-ih godina prošloga stoljeća u Sjedinjenim Američkim Državama. Prve proizvedene mreže sastojale su se od čeličnih zavara, zbog kojih njihova primjena nije naišla na veći odaziv. Nakon toga proizvedene su sintetičke mreže koje zbog nedovoljno istraženoga načina ugradnje nisu pokazale dobra svojstva u povezivanju s asfaltom. Godine 1985. u Nizozemskoj pokrenuta je proizvodnja mreža od novih materijala kao što su poliester, polipropilen, staklo i čelik [2] koji se koriste i danas.

Mreže od polipropilena i poliesteru mogu biti obložene polimerom radi otpornosti na UV stabilnost, netkanim materijalom radi zadržavanja bitumena ili patentnim polimernim premazom koji se ugrađuje između dva spojena poliesterska tekstila (najčešće kod mreža izrađenih od staklenih vlakana). Najmanja veličina otvora mreže za armiranje je 12,5 x 12,5 mm, najčešće se proizvode s otvorima veličine 25 x 25 mm, a mogu biti i s otvorima veličine 35 x 35 mm. Standardne vlačne čvrstoće iznose

50 kN/m, 100 kN/m i 200 kN/m. Mreže za armiranje asfalta postavljaju se na suhu i čistu podlogu, čija temperatura treba biti u granicama od 5°C do 60°C [17]. Površina mreže mora biti valjana gumenim ili pneumatskim valjkom. Radi učinkovitoga povezivanja mreže s podlogom potrebno je nanijeti emulziju, čija količina varira od 0,5 do 1,1 kg/m<sup>2</sup>, ovisno o prethodno tretiranoj podlozi, a određuje se na probnoj dionici. Optimalna količina emulzije određuje se kod maksimalne prionjivosti armaturne mreže i asfaltnoga sloja. Mreža mora biti napeta podjednako s obje strane postavljanja kako bi se spriječilo nastajanje preklopa i nabora. Minimalna debljina asfalta iznad postavljene mreže za armiranje iznosi 4 cm kako ne bi došlo do klizanja između asfaltnih slojeva.

Na slici 1. prikazana su mjesta (pozicije) ugradnje mreža između različitih slojeva kolničke konstrukcije i prijenos naprezanja ispod kotača vozila. Općenito je zaključeno to da se mreža za armiranje asfalta kod troslojnih kolnika postavlja između nosivoga i veznoga sloja (slika 1.a), dok se kod dvoslojnih kolnika postavlja neposredno ispod habajućega sloja (slika 1.b) [3].



Slika 1. Raspodjela naprezanja u kolniku i mjesta postavljanja mreža za armiranje asfalta: a) kod troslojnih kolnika; b) kod dvoslojnih kolnika

### 3 Pregled dosadašnjih istraživanja

U cilju optimizacije troškova održavanja i poboljšanja fizikalno-mehaničkih svojstava u cilju produljenja vijeka trajanja asfaltnih kolnika danas se koriste mreže za armiranje asfalta koje se postavljaju između slojeva kolničke konstrukcije. Na slici 2. prikazana je izražajna strukturna pukotina, a na slici 3. poprečna i uzdužna pukotina. Upotrebom mreža za armiranje asfalta takvi tipovi pukotina mogu se spriječiti ili se može smanjiti njihovo pojavljivanje.



Slika 2. Izražajna strukturna pukotina [4]



Slika 3. Poprečna i uzdužna pukotina [4]

Provedena istraživanja armaturnih mreža bila su usmjerena na utjecaj veličine otvora, materijala od kojeg je mreža proizvedena, ugradnje mreže na povezivanje slojeva u kolničkoj konstrukciji i slično.

### 3.1 Utjecaj veličine otvora i baznoga materijala armaturnih mreža

Učinkovitost armaturnih mreža ovisi o veličini i obliku otvora, veličini čestica agregata i krutosti rebara mreže. Otvori mogu biti pravokutnoga ili kvadratnoga oblika dimenzija od 6 mm do 50 mm. Pojedinačna rebara mogu biti širine od 4 mm do 8 mm [5]. Veličina otvora mora biti dovoljno velika kako bi se omogućili prodiranje agregata kroz mrežu i dobra povezanost s asfaltom.

Jaecklin i Scherer [6] proveli su dinamičko ispitivanje, *pull out* test i cikličko testiranje temperature u laboratoriju sa staklenim mrežama, poliesterskim mrežama i polipropilenskim mrežama tkanima geotekstilom. Dinamičko testiranje provedeno je na ispitnim uzorcima veličine 600 x 18 x 90 mm, primjenjujući silu od 4,5 kN pri frekvenciji od 29,3 Hz i temperaturi od 5 °C. Rezultati dinamičkoga ispitivanja pokazali su to da mreža od staklenih vlakana s vlačnom čvrstoćom od 60 kN/m ima dva puta dulji vijek trajanja od polipropilenskih i poliesterskih mreža. *Pull out* testom ispitivane su mreže od staklenih vlakana s otvorima veličine 10 mm i 30 mm te je pokazano da mreže s malim otvorima nisu pogodne za povezivanje asfalta i agregata, dok mreže s otvorima veličine 30 mm omogućuju bolju povezanost i sprečavaju stvaranje pukotina. Cikličko testiranje temperature provedeno je na ispitnim uzorcima veličine 600 x 150 x 150 mm u trajanju jednoga ciklusa od tri sata. Nakon 20 ciklusa na ispitnome uzorku formirala se pukotina duljine od 30 mm do 40 mm, koja se tijekom daljnjega ispitivanja nije povećavala. Na temelju svega navedenoga može se zaključiti to da ispitni uzorci koji su u sebi imali ugrađenu armaturnu mrežu sa staklenim vlaknima pokazuju veću izdržljivost na ispitivanja od uzoraka s ugrađenim mrežama od poliestera i polipropilena.

Siriwardane i dr. [7] u laboratoriju su ispitivali 20 asfaltnih uzoraka s armaturnom mrežom i bez nje. Među njima je 13 uzoraka imalo ugrađeno tri vrste staklenih mreža različitih masa. Autori u radu ne navode proizvođače mreža te ne specificiraju njihova svojstva (vlačnu čvrstoću). Ispitivana mreža označena kao A (najmanja vlačna čvrstoća) te mreža označena kao C (najveća vlačna čvrstoća) pokazale su da je vertikalno naprezanje manje s mrežom jače vlačne čvrstoće od staklenih vlakana, što je utjecalo na kvalitetu kolnika i sprječavanje širenja pukotina. Može se zaključiti to da mreža od staklenih vlakana ugrađena između habajućega i nosivoga sloja sprječava širenje pukotina u asfaltnim slojevima.

### 3.2 Povezivanje armaturne mreže s asfaltnom podlogom

Razina prionjivosti armaturne mreže ovisi i o vrsti premaza odnosno bitumenske emulzije za povezivanje s asfaltnim slojem. Nguyen i dr. [8] ispitivanjem su pokazali to da vrsta bitumenske emulzije utječe na funkcionalnost mreže, ali i na sam postupak ugradnje u eksploataciji.

Hakimzadeh i dr. [9] upotrijebili su *Interface Bond Test (IBT)* pri prijanjanja armaturne mreže, u sklopu kojega su primijenili različite postupke nanošenja (špricanja) bitumenske emulzije. Povećanjem količine premaza do  $0,9 \text{ kg/m}^2$  postupno je postignuta bolja povezanost između armaturne mreže i asfaltnih slojeva.

Najčešće primjenjivano ispitivanje za procjenu prionjivosti mreža jest Leutnerov test [18] razvijen u Njemačkoj. Primjenjujući modificirani Leutnerov test, Plug i de Bondt [10] utvrdili su to da se posmična čvrstoća između slojeva asfalta i armaturne mreže povećava s vremenom nakon izgradnje.

U novije vrijeme proizvode se staklene mreže s višeslojnom termoplastičnom ljepljivom tkaninom [17] koja se prilikom ugradnje topi zajedno s asfaltom. Takav način pojednostavljuje ugradnju armaturne mreže jer nije potreban emulzijski sloj, nema potrebe za sušenjem, nije potrebno brzo nanošenje premaza i ne postoji opasnost od lijepljenja kotača građevinskih vozila.

### 3.3 Pozicija armaturne mreže u asfaltnome kolniku

Upotrebom osobnih računala razvijaju se razni programi koji mogu pomoći u istraživanju svojstava armaturnih mreža. Programom Plaxis, koji je zasnovan na metodi konačnih elemenata, proučavani su položaj armaturne mreže i njezin utjecaj na asfaltnu kolničku konstrukciju [11, 12] kao što je to prikazano na slici 1. Analiza je provedena uz pravilnu raspodjelu napona i elastičnih deformacija, dok dinamičke analize nisu provedene jer u programu Plaxis nije moguće zadati model prometnoga opterećenja. Dobiveni rezultati pokazali su to da mreža postavljena na dno sloja asfalta i betona pokazuje najveće smanjenje vertikalnih deformacija u kolniku.

Calvarano i dr. [3] u svojem radu istražuju mogućnost primjene numeričkih simu-

lacija uz pomoć programa ABAQUS, koji se zasniva na metodi konačnih elemenata, kako bi dokazali pozitivan učinak ugradnje armaturne mreže za armiranje asfalta na asfaltni kolnik prilikom ponovljenoga prometnog opterećenja. Pod istim brojem ponavljanja prometnoga opterećenja ( $N = 2000$ ), pri frekvenciji od 10 Hz i impulsnome opterećenju u trajanju od 0,1 sekunde, što odgovara prosječnoj brzini od 70 km/h, ispitane su tri cestovne dionice, od kojih su dvije bile nearmirane. Cestovna dionica armirana mrežom od staklenih vlakana pokazala je to da povećanje vlačne čvrstoće u asfaltnome sloju dovodi do smanjenja vertikalnih naprezanja, čime se smanjuju pojave kolotruga prilikom ponovljenoga prometnog opterećenja.

De Bondt [13] ističe da prometno opterećenje aktivira mrežu tijekom širenja pukotine prilikom savijanja i smicanja. U slučaju pojave temperaturnoga opterećenja mreža se aktivira ranije, odnosno prilikom početka nastajanja pukotine.

### 3.4 Ispitivanja učinkovitosti mreža u kolniku

U Francuskoj su na ispitnome postrojenju IFSTTAR (*Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux*) [8] provedena brojna istraživanja upotrebe različitih armiranih međuslojnih sustava u kolniku. Postrojenje radi na principu vrtuljka i sastoji se od tornja koji je povezan s četiri kraka, od kojih je svaki dug 20 m. Na kraju svakoga kraka nalazi se kotač uz čiju se pomoć na kružnoj ispitnoj stazi radijusa 17,5 m i širine 6 m provode ispitivanja simulirajući razna prometna opterećenja.

SoldUGri [14] je prvi francuski nacionalni projekt koji se bavi ispitivanjima asfaltnih kolnika ojačanih armaturnim mrežama. Ispitivanja su se sastojala od izgradnje ispitnih sekcija s četiri različite vrste mreža i dva različita sloja kolnika. Dvije armaturne mreže imale su vlačnu čvrstoću od 20 kN/m, a dvije čvrstoću od 40 kN/m. Od ukupno pet ispitnih dionica, na jednoj dionici duljine 15 m proučavalo se oštećenje mreže nakon ugradnje. Rezultati pokazuju to da se tijekom ugradnje mreža mogu pojaviti znatna oštećenja koja dovode do ograničenoga gubitka modula elastičnosti (od 20 % do 25 %), ali i do gubitka vlačne čvrstoće (od 60 % do 80 %).

Istraživanja provedena na sveučilištima u Teksasu, Delftu i Nottinghamu [15] pokazala su to da je pojačanje asfaltnih kolnika armaturnim mrežama od staklenih vlakana puno bolje od bilo koje druge vrste geosintetičkih sustava zbog visoke krutosti staklenih vlakana.

U Hrvatskoj je 2005. armaturnim mrežama obnovljen asfaltni kolnik na trima dionicama autoceste A3 Bregana – Lipovac i na Zagrebačkoj aveniji. U cilju utvrđivanja učinka smanjenja reflektiranja strukturnih pukotina na prvoj dionici autoceste Ivanja Reka – Ivanić-Grad na pretjecajnome traku desnoga kolnika ugrađena je mreža od poliesterskih vlakana. Na drugoj dionici desnoga kolnika voznog traka autoceste Ivanja Reka – Ivanić-Grad (prva poddionica) i autoceste Dragalić – Brodski Stupnik (druga poddionica) ugrađena je mreža za armiranje asfalta od polipropilenskih vla-

kana. Na trećoj dionici autoceste Ivanja Reka – Ivanić-Grad na voznome i pretjecajnome traku lijevoga kolnika ugrađena je mreža od staklenih vlakana [4]. Nakon ugradnje na tim se dionicama nisu nastavila pratiti ponašanja armaturnih mreža u kolniku te bi trebalo provesti ispitivanja mreža i njihove učinkovitosti u eksploataciji. Ispitivanjem konstrukcijskih karakteristika mreža potrebno je utvrditi čimbenike koji utječu na njezinu učinkovitost. Čimbenici se utvrđuju mjerenjima i ispitivanjima učinkovitosti armaturnih mreža na temelju nosivosti ispitane uređajem s padajućim teretom (*Falling Weight Deflectometer* – FWD), karakteristikama vozne površine (uzdužna i poprečna ravnost) te infraspaktralnim ili laserskim kamerama za snimanje pukotina kako bi se utvrdilo je li došlo do ponovnog reflektiranja pukotina.

## 4 Zaključak

Armaturna mreža u asfaltnim kolnicima koristi se u cilju smanjenja reflektiranja strukturnih pukotina i dubina kolotruga, na što ukazuju brojna istraživanja. Armiranje kolnika ima i druge pozitivne učinke: produljenje vijeka trajanja kolnika, čime se smanjuju troškovi održavanja kolnika, te rjeđu rekonstrukciju kolnika, čime se smanjuje onečišćenje okoliša (manja emisija ugljikova dioksida u atmosferu). Negativni učinci armiranja kolnika jesu produljenje vremena ugradnje asfaltnih slojeva jer se špricani bitumenski vezni sloj mora u cijelosti osušiti prije nego se nastavi s postupkom.

Dosadašnja istraživanja u području primjene mreža ukazuju na pozitivna i negativna iskustva u laboratoriju i na terenu, što je povezano s činjenicom da svaki proizvod zahtijeva svoje sustavno sagledavanje u definiranju optimalnoga rješenja. Da bi mogli valorizirati ugrađivanje mreža, sudionici u gradnji trebaju koristiti rezultate praćenja ugrađenih mreža i njihova ponašanja u eksploataciji.

Pregled dosadašnjih istraživanja područja vezanog uz primjenu armaturnih mreža u asfaltnim kolnicima ukazao je na to da istraživanja trebaju odrediti odnos debljina slojeva između kojih bi se ugrađivala armaturna mreža, usporediti pojedine vrste mreža ovisno o baznome materijalu (staklo, polipropilen, polietilen i polivinilamid) i istražiti postupke ugradnje armaturne mreže kako bi se postiglo dobro povezivanje s asfaltom i izbjegle nepoželjne pojave pomicanja (naguravanja) mreže prilikom asfaltiranja odnosno tijekom eksploatacije.

Za daljnja istraživanja potrebno je provesti ispitivanja i mjerenja u laboratoriju i na ispitnim dionicama na temelju kojih bi se moglo odlučiti o primjeni odgovarajućega rješenja za ugradnju mreže u kolničku konstrukciju, provjeriti primjenjivost računalnih programa za dimenzioniranje kolničkih konstrukcija koje posjeduju brojni proizvođači armaturnih mreža te razraditi sustavni program praćenja ponašanja mreža nakon ugradnje u kolničku konstrukciju u svrhu suvremenoga gospodarenja kolnicima.



Izvedene probne dionice u Hrvatskoj nisu praćene na odgovarajući način te bi daljnja istraživanja mogla biti usmjerena na utvrđivanje tih dionica, što bi moglo dati nova saznanja o mrežama i njihovu ponašanju u različitim klimatskim okolnostima (ljet/zima) i o kolničkim konstrukcijama.

Glavni razlog šire upotrebe armaturnih mreža treba biti mogućnost točnoga predviđanja toga koliko će one imati pozitivnih utjecaja na kolnik. Podatak o omjeru troškova i koristi armaturnih mreža pokazao bi isplativost njihove primjene u kolnicima.

## Literatura

- [1] ERF (European Union Road Federation), Road Network 2017, <http://erf.be/statistics/road-network-2017/>
- [2] De Bondt, A.H.: Research on geogrids in asphalt pavements, Jubilee Symposium on Polymer Geogrid Reinforcement, London, United Kingdom, 2009.
- [3] Calvarano, L.S., Palamara, R., Leonardi, G., Moraci, N.: 3D-FEM Analysis on Geogrid Reinforced Flexible Pavement Roads, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 95 (2017) 2, pp. 1-10.
- [4] Šimun, M.: Obnova asfaltnih kolnika-primjeri iz prakse, Gospodarenje prometnom infrastrukturom, Dani prometnica 2009, Zagreb, pp. 241-285.
- [5] Zofka, A., Maliszewski, M., Maliszewska, D.: Glass and carbon geogrid reinforcement of asphalt mixtures, Road Materials and Pavement Design, 18 (2017) 1, pp. 471-490.
- [6] Jaecklin F.P., Scherer, J.: Asphalt reinforcing using glass fibre grid „Glasphalt“, Proceedings of the 3rd International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements: Design and Performance of Overlay Systems, Maastricht, 1996.
- [7] Siriwardane, H., Gondle, R., Kutuk, B.: Analysis of Flexible Pavements Reinforced with Geogrids, Geotechnical and Geological Engineering, 28 (2010) 3, pp. 287-297.
- [8] Nguyen, M.L., Blanc, J., Kerzrého, J., Hornych, P.: Review of glass fibre grid use for pavement reinforcement and APT experiments at IFSTTAR, Road Materials and Pavement Design, 14 (2013) 1, pp. 287-308.
- [9] Hakimzadeh S., Kebede N.A., Buttlar W.G., Ahmed S., Exline M.: Development of fracture-energy based interface bond test for asphalt concrete, Road Materials and Pavement Design, 13 (2012) 1, pp. 76-87.
- [10] Plug C.P., de Bondt A.H.: Adhesion of reinforcement grids in asphalt overlays, 5<sup>th</sup> World congress on emulsion, Lyon, 2010.
- [11] Moayedi, H., Kazemian, S., Prasad, A., Huat, B.: Effect of Geogrid Reinforcement Location in Paved Road Improvement, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 14 (2009), pp. 3313-3329.

- [12] Pandey, S., Rao, K. R., Tiwari, D.: Effect of Geogrid Reinforcement on Critical Responses of Bituminous Pavements, 25th ARRB Conference – Shaping the future: Linking policy, research and outcomes, Perth, Australia, pp. 1-17, 2012.
- [13] De Bondt, A.H.: 20 years of research on asphalt reinforcement – Achievements and future needs, 7th international RILEM conference on cracking in pavements, Delft, pp. 327-335, 2012.
- [14] Chazallon, C, Nguyen, T. C., Nguyen, M.L., Hornych, P., Doligez, D., Brissaud, L., Godard, E.: In situ damage evaluation of geogrid udes in asphalt concrete pavement, The 10th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Greece, 2017.
- [15] Ahmed, M., Abdelhamid, Mennatallah, Hussain, S., Khedr, S. A., Breakah, T., Saady, M., Elkadi, O., Abou-Zeid, M.N.: Geogrid reinforcement in flexible paved roads, Building Tomorrow's Society, Canada, pp. 1-11, 2018.
- [16] Zornberg, J.G., Gupta, R.: Geosynthetics in Pavements: North American Contributions, 9th International Conference on Geosynthetics, Brazil, pp. 379-400, 2010.
- [17] ADFORS, Brošura GlassGrid PG, [https://eu.adfors.com/sites/eu.adfors.com/files/Road%20Reinforcement/GlasGrid%20PG\\_TDS\\_2019.01.pdf](https://eu.adfors.com/sites/eu.adfors.com/files/Road%20Reinforcement/GlasGrid%20PG_TDS_2019.01.pdf)
- [18] Leutner, R.: Untersuchung des Schichtenverbundes beim bituminösen Oberbau, Bitumen, 41 (1979) 3, pp. 84-91.



# Potpunije razumijevanje uzroka i procesa širenja oštećenja u betonskim pločama mostova kroz komplementarnu primjenu NDE i SHM

Prof.dr.sc. **Nenad Gucunski**

Rutgers University, Piscataway, New Jersey, USA, [gucunski@soe.rutgers.edu](mailto:gucunski@soe.rutgers.edu)

## Sažetak

Postignut je značajan napredak u učinkovitosti nerazornih metoda ispitivanja (NDE) vezano uz otkrivanje i opis oštećenja betonskih ploča mostova. Unatoč tome, kako bi se u potpunosti razumjeli uzroci i složeni procesi širenja oštećenja, potrebno je ispitati dodatne utjecaje od onih koji se mogu otkriti NDE metodama. Bit će prikazane koristi od primjene većeg broja NDE tehnologija, posebno onih koje omogućuju brzo i automatizirano prikupljanje podataka. Također će biti opisane inicijative zajedničke primjene NDE i metoda praćenja ponašanja konstrukcija (SHM) u postizanju potpunijeg razumijevanja ponašanja ploča mostova i širenja oštećenja.

*Ključne riječi: armirani beton, ploče, mostovi, oštećenja, NDE, SHM*

## Knowledge creation about causes and processes of deterioration progression in concrete bridge decks through complementary use of NDE and SHM

### Abstract

Significant advances were made in NDE technologies' efficiency for detecting and characterizing deterioration in bridge decks. Deterioration processes, since they are a result of multiple inputs and actions, are inherently complex. Therefore, additional influences require examination to provide the most complete answers regarding disparate bridge deck performance. The presentation provides an overview of the benefits stemming from multi-NDE technology surveys, especially those employing rapid and automated data collection and analysis. It also explores the ways of gaining additional knowledge about the bridge deck performance through complementary use of NDE and SHM.

*Key words: reinforced concrete, decks, bridges, deterioration, NDE, SHM*



# Iskustva s radionice “Modelling Contact and Resolving Convergence Issues with Abaqus”

**Maja Baniček**

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

## Sažetak

U ovoj prezentaciji predstaviti će se iskustva s trodnevnog seminara “Modelling Contact and Resolving Convergence Issues with Abaqus” (“Modeliranje kontakata i rješavanje problema konvergencije u Abaqusu”) održanog u Beču, Austrija od 20. do 22. svibnja 2019. godine. Računalni program Abaqus je paket inženjerskih alata za simulacije metodom konačnih elemenata (engl. Finite Element Method – FEM). Njime se rješavaju relativno jednostavni linearni, ali i najkompleksniji nelinearni numerički problemi. Ovaj trodnevni seminar je napredni seminar kojim se stječu znanje i vještine za izradu detaljnih numeričkih FEM modela i simulacija u računalnom programu Abaqus. Kako je postizanje konvergencije i dobivanje točnih rezultata najčešće povezano s pravilnim definiranjem kontakata, seminar je obuhvaćao dvije glavne cjeline, a to su pravilno definiranje kontakata i mogući problemi s konvergencijom. Uz opsežna predavanja, seminar uključuje i radionice, pa time polaznik, osim teorijskog znanja, stječe i praktične vještine na konkretnim primjerima. U ovoj prezentaciji će se dati kratak pregled seminara i pokazati jedan primjer koji se upravo izrađuje u sklopu projekta “Razvoj DIV elastična kopče”.

*Cljučne riječi: Abaqus, metoda konačnih elemenata (MKE), nelinearna analiza, kontakti*

## Sharing experiences from the training course “Modelling Contact and Resolving Convergence Issues with Abaqus”

### Abstract

In this presentation, experiences from the three-day training course “Modelling Contact and Resolving Convergence Issues with Abaqus”, 20-22 May 2019, Vienna, will be presented. Abaqus is a software suite used for modelling of simple as well as complex engineering simulations using Finite Element Method (FEM). This training course is an advanced course designed to improve knowledge and skills in detailed FEM numerical modelling and simulations using Abaqus. Obtaining a converged solution and accurate results is related to correct contacts definition, thus the training course is divided into two parts, appropriate contact definition and possible convergence issues. In addition to the comprehensive lectures, the training course includes workshops. In that way, the participants gain theoretical and practical skills for solving real-world engineering problems. In the presentation, the insight into the course will be given and an example from the project “Development of DIV elastic clip” will be shown.

*Key words: Abaqus, Finite Element Method (FEM), nonlinear analysis, contacts*

# Usavršavanje na doktorskoj školi Sveučilišta École Polytechnique Fédérale de Lausanne

Ivana Carević

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

## Sažetak

Razumijevanje mikrostrukture materijala ključno je za razumijevanje njegovih svojstava i utjecaja na ispitane parametre cementnih kompozita u kojima se materijal koristi. U organizaciji renomiranog Sveučilišta École Polytechnique Fédérale de Lausanne, doktorska škola daje pregled najnovijih dostignuća vezanih uz hidrataciju cementnih materijala. Radionica omogućava detaljno teorijsko i praktično razumijevanje i usavršavanje u primjeni mikrostrukturnih analiza za karakterizaciju samog materijala i cementnih kompozita u kojima se primjenjuje novi materijal. U sklopu predavanja predstavljen je koncept doktorske škole te je dan pregled naprednih tehnologija koje se koriste u proučavanju hidratacije cementnih kompozita i mikrostrukture.

*Ključne riječi: doktorska škola, mikrostruktura, cementni kompoziti, napredne metode, karakterizacija, usavršavanje*

## Training at the École Polytechnique Fédérale de Lausanne doctoral school

### Abstract

Understanding the microstructure of a material is the key for understanding its properties and impact on the parameters of the cement composites where the material is used. Organized by École Polytechnique Fédérale de Lausanne, doctoral school gives an overview of the most recent advances on hydration of cementitious materials. The workshop provides detailed theoretical and practical understanding and improvement in the application of the microstructural analyses for the characterization of the material and cement composites where the new material is applied. Presentation gives the main concept of the doctoral school and an overview of advanced methods used in the study of the cement composites hydration and microstructures.

*Key words: doctoral school, microstructure, cement composites, advance methods, characterization, training*

# Ljetna škola za procjenu rizika i sposobnosti oporavka konstrukcija

**Tvrtko Renić**

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za konstrukcije, trenic@grad.hr

## Sažetak

Od 26. lipnja do 4. srpnja 2019. godine u Ljubljani je održana ljetna škola za procjenu rizika i sposobnost oporavka konstrukcija. Škola se sastojala od teoretskih predavanja i praktičnog rješavanja problema na računalima. Sudionici su upoznati s osnovama potresnog inženjerstva i seizmologije, nakon čega je detaljnije objašnjen postupak procjene seizmičkog hazarda i određivanja fragility krivulja. Prikazan je način određivanja rizika i procjene troškova određene konstrukcije na temelju prethodno objašnjenih metoda. Dan je uvod u procjenu sposobnosti oporavka konstrukcija, sustava i gradova.

*Ključne riječi: rizik, sposobnost oporavka, hazard, fragility krivulje, potres, procjena troškova*

## Summer school on risk and resilience estimation

### Abstract

Summer school on risk and resilience estimation was held in Ljubljana from July 26<sup>th</sup> to July 4<sup>th</sup>, 2019. School was comprised of theoretical lectures and practical tutorials. Basics of earthquake engineering and seismology were presented, followed by detailed explanation of hazard assessment and construction of fragility curves. Based on those parameters risk assessment and cost estimation are given. Introduction to resilience estimation of structures, systems and cities was provided.

*Key words: risk, resilience, hazard, fragility curves, earthquakes, cost estimation*



## **RUCONBAR na sajmu inovacija Silicon Valley International Invention Festival**

Doc. dr. sc. **Ivo Haladin**

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

### **Sažetak**

U svojstvu predstavnika proizvoda za zaštitu od buke RUCONBAR (Rubberized Concrete Noise Barriers), razvijenog u sklopu istoimenog projekta, nastupio sam na međunarodnom sajmu inovacija Silicon Valley International Invention Festival (SVIIF) koji se održao u Santa Clara Convention Center, California, SAD od 2. do 4. srpnja 2018. u organizaciji IFIA-e. Na sajmu inovacija sudjelovalo je 450 inovatora iz 25 zemalja svijeta koji su predstavili više od 400 inovacija. Projekt RUCONBAR predstavljen je u sklopu štanda Udruge inovatora Hrvatske, te je pobudio interes velikog broja posjetitelja među kojima valja istaknuti predstavnike građevinskog odjela San Jose State University, predsjednika međunarodne organizacije IFIA, te više predstavnika tvrtki iz građevinskog sektora. U sklopu sajma, inovacije je ocjenjivao stručni žiri koji je detaljno razmotrio sve aspekte predstavljenih proizvoda. RUCONBAR je osvojio srebrnu medalju za inovativnost, čime je na najbolji način predstavio proizvod u SAD-u, ali i Građevinski fakultet kao instituciju zaslužnu za razvoj inovativnih rješenja i proizvoda.

*Ključne riječi: RUCONBAR, inovacije, SVIIF, IFIA*

## **RUCONBAR presented at Silicon Valley International Invention Festival**

### **Abstract**

As a representative of innovative noise protection solution RUCONBAR (Rubberized Concrete Noise Barriers) developed through the homonymous project, I have participated in an IFIA organized event Silicon Valley International Invention Festival (SVIIF), held in Santa Clara Convention Center, California, USA from 2<sup>nd</sup> to 4<sup>th</sup> July 2018. The Invention festival hosted 450 innovators from 25 countries that presented more than 400 innovations. Project RUCONBAR was presented in scope of Union of Croatian Inventors exhibition stand and has raised interest of a large number of visitors including representatives of Construction department at San Jose State University, president of international association IFIA, as well as several representative of construction companies. In scope of the Festival, professional jury board has thoroughly analysed all aspects of presented innovations. RUCONBAR has won Silver medal for innovation, which promotes the product in a very positive way for US market. Faculty of Civil Engineering is therefore also recognized as an institution capable of developing cutting edge, innovative solutions and products.

*Key words: RUCONBAR, innovations, SVIIF, IFIA*

## 12. UIC radionica o buci i vibracijama na željeznici

Doc. dr. sc. **Ivo Haladin**

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

### Sažetak

Buka i vibracije pri prometovanju željezničkih vozila pobuđuju vrlo velik interes stručne i znanstvene javnosti na području EU. 19. ožujka 2019. godine održana je radionica 12<sup>th</sup> UIC Workshop on Railway Noise and Vibrations, u središtu UIC-a (Međunarodne unije za željeznicu), u Parizu, Francuska. Radionica UIC-a o buci i vibracijama na željeznici godišnji je događaj koji polaznicima daje uvid u trenutno stanje područja i trendove vezane za razvoj znanstvenih istraživanja, stručnih poduhvata i EU regulative iz spomenutog područja. Kroz sudjelovanje na radionici predstavljene su kratkoročne i dugoročne strategije smanjenja razina buke i vibracija od željezničkog prometa u Europi i svijetu, novosti u normama i pravilnicima, te kompetitivnim natječajima za financiranje budućih znanstvenih istraživanja iz područja, a detaljno su predstavljena i nova znanstvena otkrića i trendovi vezano uz buku i vibracije na željeznici.

*Gljučne riječi: UIC, buka, vibracije, radionica*

## 12<sup>th</sup> UIC Workshop on Railway Noise and Vibrations

### Abstract

Noise and vibrations of railway vehicles raise a substantial interest of professional and scientific community in EU. 12<sup>th</sup> UIC Workshop on railway Noise and Vibrations has been held on 19<sup>th</sup> March 2019 in UIC headquarters in Paris, France. Workshop is an annual gathering of experts and scientists that gives the insight into current state of the art related to scientific and professional activities as well as EU regulation related to railway noise and vibrations. Through participation in this workshop, extensive information related to short-term and long-term strategies for noise and vibration mitigation in EU and the world have been presented, news regarding standards and regulations as well as competitive project calls for financing of projects in these topics. New scientific discoveries and trends related to noise and vibration mitigation have been presented and discussed at the workshop.

*Key words: UIC, noise, vibrations, workshop*

## Suradnja i usavršavanje s Deltares institutom u Nizozemskoj

**Klaudija Bašić**

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

### Sažetak

U sklopu predavanja predstavljeno je osobno iskustvo predavača na dodatnom i stručnom usavršavanju zaposlenika koje je održano na Deltares institutu u Nizozemskoj. U ovom predavanju predstavljen je istraživački put do odabira teme doktorskog rada te zašto se ukazala potreba za stručnim usavršavanjem u inozemstvu. Fokus predavanja je na aktivnostima koje su prethodile suradnji s Deltares institutom, aktivnostima koje su odrađene tijekom stručnog usavršavanja te znanju i vještinama koje su prikupljene tijekom boravka u Nizozemskoj. Posebno je dan osvrt na primjenu stečenog znanja i vještina nakon stručnog usavršavanja predavača. U sklopu predavanja istaknute su i glavne razlike između usavršavanja u grupnim tečajevima te usavršavanja individualnim pristupom. Istaknuta je i važnost podrške i suradnje s kolegama iz inozemstva.

*Gljučne riječi: stručno usavršavanje, doktorski rad, Deltares institut*

## Collaboration and training with the Deltares institute in the Netherlands

### Abstract

This lecture presents personal experience during additional and professional training at the Deltares Institute in the Netherlands. The research path of a selection of doctoral thesis and the need for professional training abroad is presented. The focus of the seminar are activities that preceded the cooperation with the Deltares Institute, the activities that were carried out during the professional training and the knowledge and skills that were collected during a stay in the Netherlands. Particular attention is given to the application of acquired knowledge and skills after professional training. The main differences between the training in group courses and the individual professional training approach were also highlighted. The importance of supporting and collaborating with colleagues from abroad is emphasized.

*Key words: professional training, doctoral thesis, Deltares Institute*

## **Povezivanje sa znanstvenicima u inozemstvu - UKF projekt: seizmičko ponašanje višekatnih konstrukcija**

**Mislav Stepinac**

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

### **Sažetak**

Glavni cilj UKF projekata je povezivanje sa znanstvenicima u inozemstvu te odlazak na kratko usavršavanje. Cilj je ovog projekta prikupiti, analizirati i usporediti različite principe proračuna i ponašanja konstrukcija u potresno osjetljivim područjima. Analizirat će se moderne konstrukcije, s posebnim osvrtom na analizu drvenih i zidanih konstrukcija. Numerički modeli usporedit će se s rezultatima mjerenja na postojećim objektima. Uzimajući u obzir lokaciju Hrvatske koja se nalazi u vrlo seizmičkom području, promocija novih tehnologija nužan je čimbenik za razvoj održive i efikasnije gradnje.

*Ključne riječi: potres, CLT, ziđe, monitoring, proračun, Eurokod 8*

## **Collaboration with the scientists abroad - UKF project: seismic behaviour of multi-storey buildings**

### **Abstract**

The main goal of UKF projects is to connect with scientists abroad and go for short specialization. The main purpose of this project is to comprehend, gather and compare different state-of-the-art principles of the design and seismic behaviour of structures. Novel type of structures with the focus on timber and masonry structures will be analysed. The numerical models will be compared with the measurement results on existing structures. For Croatia, considering it being situated in a seismically active area, the promotion of new technologies is crucial for the development of a more sustainable construction sector.

*Key words: earthquake, seismic design, CLT, masonry, monitoring, Eurocode 8*



**SAŽECI OBRANJENIH  
DOKTORSKIH RADOVA**  
rujan 2018. - srpanj 2019.

**Sažeci obranjenih doktorskih radova u razdoblju rujan 2018. - srpanj 2019.  
(abecednim redom)**

| NASLOV DISERTACIJE / AUTOR  | Str. |
|---|------|
| <b>2018. godina</b>   |      |
| Razvoj modela za proračun površinskih komponenata bilance voda uz integraciju daljinskih istraživanja<br>dr.sc. Vedran Ivezic                                 | XX   |
| Incorporation of Health and Safety into Building Information Modelling through Hazard integration system<br>dr.sc. Matej Mihic                                | XX   |
| Nosivi sloj kolničkih konstrukcija nerazvrstanih cesta s biopepelom kao vezivom<br>dr.sc. Martina Zagvozda  | XX   |
| <b>2019. godina</b>   |      |
| Posmična otpornost križno lameliranih drvenih grednih elemenata<br>dr.sc. Mario Jeleč   | XX   |
| Pokazatelji seizmičke otpornosti stupova mostova bez suvremenog oblikovanja detalja za duktilno ponašanje<br>dr.sc. Mladen Srbić                              | XX   |
| Definiranje metodologije određivanja koeficijenta odumiranja pokazatelja fekalnog onečišćenja u uvjetima pronosa kroz krški vodonosnik<br>dr.sc. Željko Šreng | XX   |

## **dr.sc. Vedran Ivezić**

### **Životopis**

Rođen je 1982. u Zagrebu, gdje je završio osnovnu školu i V. gimnaziju. Godine 1997. upisao se na Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, na kojem je 2008. diplomirao, završivši sveučilišni diplomski studij, usmjerenje hidrotehnika. Od 2008. do 2013. radio je kao projektant u tvrtki HidroKonzalt d.o.o. Od 2013. radi u tvrtki HidroKonzalt projektiranje d.o.o. kao projektant. Od 2008. sudjeluje u obavljanju niza stručnih poslova, od izrade studija i idejnih rješenja do izrade idejnih, glavnih i izvedbenih projekata u području projektiranja u hidrotehnici. U koautorstvu objavio je niz znanstvenih i stručnih radova.

Mentor: Doc.dr.sc. **Damir Bekić**

Datum obrane: 1. 10. 2018.

### **Naslov doktorskog rada**

## **Razvoj modela za proračun površinskih komponenata bilance voda uz integraciju daljinskih istraživanja**

### **Sažetak**

“Bilanca voda” drugi je naziv za načelo očuvanja mase kojim se promjena ukupnoga volumena vode, ulaz (oborine, topljenje snijega) i izlaz vode (evaporacija, transpiracija, površinsko i podzemno otjecanje) na nekome području dovode u ravnotežu. Proučavanje bilance voda, uz prethodno poznavanje klimatskih i fizičkih značajki sliva, pruža informaciju o postojećim i budućim količinama vode te dodatni uvid u složeni proces otjecanja na slivu. Cilj doktorskoga rada bio je razvoj integriranoga raščlanjenoga modela bilance voda koji se koristi GIS tehnologijom, daljinskim istraživanjima i platformom otvorenoga koda za proračun površinskih komponenata bilance voda. Znanstveni je doprinos ostvaren integracijom daljinskih istraživanja u model bilance voda za pouzdan proračun prostornih i vremenskih varijacija površinskih komponenata bilance voda na slivu iz standardnih (diskretnih) hidrometeoroloških mjerenja kroz razvoj metode za procjenu prostorne raspodjele temperature zraka na slivu uz integraciju podataka daljinskoga mjerenja, razvoj metode za procjenu evapotranspiracije na slivu uz parcijalnu integraciju podataka daljinskoga mjerenja i razvoj integriranoga raščlanjenoga modela bilance voda “IVOR”.



## **dr.sc. Matej Mihić**

### **Životopis**

Rođen je 1988. u Zagrebu, gdje je pohađao i osnovnu i srednju školu. Godine 2007. upisao se na Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, na kojemu je 2012. diplomirao s najvećim pohvalama, zaposlio se kao asistent i upisao na poslijediplomski doktorski studij. Temu doktorskoga rada prijavio je 2016., a akademski stupanj doktora znanosti stekao je 2018. godine. Tijekom rada na Fakultetu objavio je tri članka u znanstvenim časopisima, osam članaka na znanstvenim konferencijama i četiri stručna rada. Područje njegova znanstvenoga istraživanja i interesa obuhvaća zaštitu na radu, Building Information Modelling (BIM), produktivnost rada i praćenje procesa gradnje. Uz znanstveni rad izvodio je nastavu na diplomskome i preddiplomskome studiju građevinarstva u području organizacije i tehnologije građenja na sljedećim kolegijima: Metode organizacije u građevinarstvu, Proučavanje rada, Terenska nastava, Organizacija građenja i Građevinski poslovni sustavi. Također je bio i komentor na 16 diplomskih radova. Osim znanstvenoga i nastavnoga rada radi u građevinskoj praksi kao ovlaštenu inženjer građevinarstva, koordinator zaštite na radu, konzultant i sudski vještak.

Mentor: Prof.dr.sc. **Ivica Završki**

Datum obrane: 27. 9. 2018.

### **Naslov doktorskog rada**

## **Incorporation of Health and Safety into Building Information Modelling through Hazard integration system**

### **Sažetak**

U doktorskom je radu prikazan razvoj Sustava za automatsku identifikaciju opasnosti (Hazard Integration System; u nastavku Sustav). Sustav je razvijen kako bi se smanjio broj ozljeda i smrtnih slučajeva te poboljšao sustav zaštite na radu (ZNR) u građevinarstvu. To čini tako što iskorištava potencijale inovativnih tehnologija, posebno Informacijskoga modeliranja gradnje (Building Information Modelling – BIM), kako bi omogućio automatiziranu identifikaciju opasnosti, povezujući BIM modele s posebno razvijenom Bazom podataka o opasnostima. Osnovna je pretpostavka Sustava da se svi elementi BIM modela, koji predstavljaju stvarne elemente izgrađene građevine, grade od poznatoga i konačnoga broja pojedinih građevinskih aktivnosti. Te aktivnosti izvode građevinski radnici i pri svojem izvođenju generiraju opasnosti za život i zdravlje radnika koji izvode te aktivnosti i drugih osoba koje se nalaze u istome vremenu i prostoru. Zato to istraživanje doprinosi području zaštite na radu u građevinarstvu razvijanjem konceptualno univerzalne metodologije identifikacije opasnosti. Razvijen koncept može se primijeniti za identifikaciju opasnosti za život i zdravlje radnika koje su nastale kao posljedica izvođenja građevinskih aktivnosti na bilo kojemu elementu građevine koji se može modelirati u BIM-u. Izvorni znanstveni doprinos jest razvoj Sustava za automatsku identifikaciju opasnosti, čiji je cilj omogućiti jednostavnu i učinkovitu identifikaciju opasnosti za život i zdravlje radnika u građevinarstvu. Te su opasnosti identificirane i strukturirane u bazu podataka kompatibilnu s BIM-om i klasificirane tako da Sustav može uzeti u obzir i profesionalne bolesti i interakciju radnika na gradilištu. Praktični je doprinos istraživanja u potencijalu da se automatiziranom identifikacijom opasnosti smanji broj ozljeda i smrtnih slučajeva na radu u građevinarstvu.

## **dr.sc. Martina Zagvozda**

### **Životopis**

Rođena je 1988. u Osijeku. Diplomirala je 2012. na Građevinskom fakultetu Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, na kojemu od travnja 2013. radi kao asistentica u Zavodu za geotehniku, prometnice i geodeziju. U prosincu 2013. upisala se na poslijediplomski doktorski studij, smjer Prometnice, na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, na kojem je 2018. obranila disertaciju. Godine 2015. završila je program pedagoško-psihološke i didaktičko-metodičke izobrazbe na Fakultetu za odgojne i obrazovne znanosti Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku. Područje njezina znanstvenoga istraživanja obuhvaća kolničke konstrukcije, posebno mogućnosti primjene nestandardnih materijala. Kao autorica i koautorica objavila je 20 znanstvenih i stručnih radova te sažetaka u zbornicima.

Mentor: Prof.dr.sc. **Tatjana Rukavina**

Datum obrane: 21. 12. 2018.

### **Naslov dokorskog rada**

## **Nosivi sloj kolničkih konstrukcija nerazvrstanih cesta s biopepelom kao vezivom**

### **Sažetak**

Drvni su biopepeli nusproizvodi proizvodnje energije iz obnovljivih izvora, što je potaknuto europskom Direktivom 2009/28/EC. Svojim kemijsko-fizikalnim svojstvima potencijalna su zamjena za standardno korišteno hidrauličko vezivo pri provedbi mjera poboljšanja lokalnoga tla. Istraživanje je provedeno radi utvrđivanja mogućnosti primjene biopepela kao zamjene za vapno pri stabilizaciji lokalnih tala, a u svrhu izvedbe nosivih slojeva nerazvrstanih cesta. Na ukupno 30 različitih mješavina provedena su ispitivanja fizikalno-mehaničkih svojstava i ekološkoga utjecaja te je analizirano ponašanje nosivih slojeva s biopepelom u kolničkoj konstrukciji nerazvrstanih cesta. Rezultati ispitivanja pokazali su to da se u određenoj mjeri, koja ovisi o svojstvima lokalnoga tla, vapno može zamijeniti biopepelima uz postizanje podjednake ili boljih mehaničkih svojstava u ovisnosti o osnovnome tlu. Znanstveni je doprinos rada u definiranju učinka biopepela i njegove interakcije s vapnom na inženjerska svojstva mješavina (čvrstoću, nosivost i otpornost na smrzavanje) za izradu nosivih slojeva kolničkih konstrukcija nerazvrstanih cesta, od lokalnih materijala istočne Slavonije kao gradiva i alternativnoga veziva, biopepela, u optimizaciji sastava projektnih mješavina kojima će se zadovoljiti kriteriji postavljeni tehničkom regulativom koja se odnosi na primjenu u nosivim slojevima i u ponašanju modela kolničkih konstrukcija nerazvrstanih cesta s nosivim slojem vezanim biopepelom.

## **dr.sc. Mario Jeleč**

### **Životopis**

Mario Jeleč rođen je 1990. u Doboju, u Bosni i Hercegovini. Diplomirao je 2013. na Građevinskom fakultetu Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku. Dobitnik je nekoliko Dekanovih nagrada i Rektorove nagrade za uspjehe tijekom studija. Od 2013. zaposlen je na Građevinskom fakultetu Osijek kao asistent na Zavodu za materijale i konstrukcije, a 2019. obranio je disertaciju na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Nastavno se usavršavao 2015. kroz program pedagoško-psihološke i didaktičko-metodičke izobrazbe na Fakultetu za odgojne i obrazovne znanosti u Osijeku. Dva se mjeseca znanstveno usavršavao na Sveučilištu u Lundu, u Švedskoj, uz potporu COST akcije „FP1402 - Basis of Structural Timber Design - from Research to Standards“. Objavio je 15 znanstvenih radova te sudjelovao na konferencijama u zemlji i inozemstvu. Govori engleski i njemački jezik.

Mentor: Prof.dr.sc. **Vlatka Rajčić**

Datum obrane: 31. 5. 2019.

### **Naslov doktorskog rada**

## **Posmična otpornost križno lameliranih drvenih grednih elemenata**

### **Sažetak**

U disertaciji prikazana su eksperimentalna, numerička i teorijska istraživanja u cilju definiranja novoga analitičkog modela posmične otpornosti križno lameliranih drvenih (CLT) grednih elemenata. U skladu s teorijom kompozitnih nosača razvijeni su analitički izrazi za proračun komponenti posmičnih naprezanja. Numeričkim parametarskim analizama definirani su izrazi za faktore raspodjele naprezanja, na temelju kojih su predložena dva pojednostavljena prijedloga proračuna, primjenjiva u svakodnevnoj inženjerskoj praksi. Validacija analitičkog modela i pojednostavljenih prijedloga proračuna napravljena je usporedbom s rezultatima vlastitoga laboratorijskog ispitivanja. Za laboratorijski ispitane vrijednosti posmične čvrstoće predloženi model dobro procjenjuje vrijednosti posmične otpornosti eksperimentalno ispitanih, grednih CLT elemenata. Dodatnim numeričkim analizama razvijeni su izrazi za faktore koncentracije naprezanja, na temelju kojih je predložen analitički model prilagođen i procjeni posmične otpornosti grednih CLT elemenata s otvorima ili zasjecima. Provedbom laboratorijskih ispitivanja na CLT nosačima s otvorima ili zasjecima dobiveno je dobro slaganje s analitičkim vrijednostima posmične otpornosti. Disertacija daje znanstveni doprinos u kontekstu proširenja saznanja o ponašanju križno lameliranih drvenih grednih elemenata kroz proširenje baze provedenih laboratorijskih ispitivanja, provedbu opsežne parametarske numeričke analize, razvoj novoga analitičkog modela posmične otpornosti i krutosti nosača, prilagodbu i mogućnost primjene predloženoga modela u slučaju postojanja otvora ili zasjeka te razvoj pojednostavljenih proračunskih modela namijenjenih svakodnevnoj inženjerskoj upotrebi. Prikazani rezultati doprinijet će razvoju križno lameliranog drveta, čiji je postupak standardizacije trenutačno u tijeku i čije se uključivanje u novu generaciju norme Eurokod 5 očekuje do 2021. godine.

## dr.sc. Mladen Srbić

### Životopis

Rođen je 12. listopada 1982. u Sisku. Diplomirao je 2008. na Građevinskom fakultetu. Nakon što je završio studij, započeo je radni odnos na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu kao stručni suradnik u Zavodu za konstrukcije, na Katedri za mostove. Od 2011. radi na poslovima u suradničkom zvanju asistenta. Doktorirao je 2019. godine. Nakon doktorata nastavio je raditi na Građevinskom fakultetu, na poslovima u suradničkom zvanju višeg asistenta. Član je nekoliko znanstveno stručnih udruženja. Do sada je ukupno objavio šesnaest radova te sudjelovao na konferencijama u zemlji i inozemstvu. Kao suradnik sudjelovao je na brojnim stručnim poslovima projektiranja mostova. Govori engleski jezik.

Mentor:           Izv.prof.dr.sc. **Ana Mandić Ivanković**

Datum obrane: 17. 4. 2019.

### Naslov doktorskog rada

## **Pokazatelji seizmičke otpornosti stupova mostova bez suvremenog oblikovanja detalja za duktilno ponašanje**

### Sažetak

S obzirom na to da velik broj mostova izgrađenih u zadnjoj polovini prošloga stoljeća po tada važećim propisima danas još uvijek predstavlja ključne elemente prometne infrastrukture u Hrvatskoj, a većina ih se nalazi u seizmički aktivnim područjima te nije dimenzionirana i oblikovana za takva djelovanja, glavni je cilj ovog istraživanja bio utvrditi stvarne sposobnosti rotacije plastičnih zglobova postojećih starijih mostova na temelju analize pokazatelja seizmičke otpornosti za netipične presjeke stupova s ugrađenom glatkom armaturom, čiji detalji nisu oblikovani za duktilno ponašanje. Specifični je cilj bio utvrditi primjenu postojećih izraza danih normama EN 1998-2 i EN 1998-3 za važne pokazatelje potresne otpornosti. Istraživanje obuhvaća parametarsku i eksperimentalnu analizu na modelima stupova prethodno navedenih karakteristika. Rezultati ovog istraživanja doprinose seizmičkome ocjenjivanju mostova koji nisu projektirani u skladu sa suvremenim smjernicama duktilnoga ponašanja. Navedeni je doprinos vidljiv kroz ocjenu primjenjivosti postojećih normiranih izraza za pokazatelje seizmičke otpornosti na elemente s poligonalnim poprečnim presjekom, izvedene s glatkom armaturom, a koji nisu izvedeni u skladu sa suvremenim smjernicama duktilnoga ponašanja. Dodatni je doprinos vidljiv kroz pozitivan učinak proklizavanja glatke armature, ali i negativan učinak poligonalnoga presjeka u odnosu na pravokutni kod definiranja pokazatelja seizmičke otpornosti. Proširenje postojeće baze eksperimentalnih istraživanja tako oblikovanih stupova također je doprinos ovog istraživanja.

## **dr.sc. Željko Šreng**

### **Životopis**

Rođen je 1988. u Zagrebu. Osnovnu školu završio je u Slatini, a srednju školu, I. gimnaziju, 2007. u Osijeku te se upisao na Građevinski fakultet Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera. Diplomirao je 2012., završivši sveučilišni diplomski studij, usmjerenje hidrotehnika, te stekao zvanje magistra inženjera građevinarstva. Od veljače 2013. radi kao asistent na matičnome fakultetu u Osijeku. Godine 2013. upisao se na poslijediplomski doktorski studij na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, na kojem je u veljači 2019. obranio disertaciju. Objavio je više znanstvenih i stručnih radova te sudjelovao na konferencijama u zemlji i inozemstvu.

Mentor: Prof.dr.sc. **Goran Lončar**

Datum obrane: 13. 2. 2019.

### **Naslov doktorskog rada**

## **Definiranje metodologije određivanja koeficijenta odumiranja pokazatelja fekalnog onečišćenja u uvjetima pronosa kroz krški vodonosnik**

### **Sažetak**

Ovim radom predstavljena je metodologija za određivanje koeficijenta odumiranja pokazatelja fekalnoga onečišćenja (*Escherichia coli* i enterokoki) zbog pronosa podzemnom vodom kroz analiziranu kršku sredinu. Metodologija pretpostavlja sukcesivnu primjenu statističkoga, analitičkoga i numeričkoga modeliranja u svrhu definiranja kapaciteta samopročišćivanja analiziranoga vodonosnika (efekti sorpcije i odumiranja iskazani pripadnim koeficijentima). Analizirani vodonosnik Bokanjac-Poličnik smješten je u zaleđu grada Zadra. Preliminarne analize kao početni korak metodologije poslužile su u konkretiziranju određenih pretpostavki vezanih uz detektiranje pokretača povećanih koncentracija onečišćenja na analiziranim zdencima te u određivanju mjesta potencijalnoga izvora onečišćenja. Utvrđeno je to kako su oborine dominantni pokretač povećane koncentracije onečišćenja na zdencima. Provedeno integralno probno crpljenje poslužilo je u određivanju potencijalnoga mjesta izvora onečišćenja. Analitički je model podijeljen na dva dijela: vertikalnu i horizontalnu dionicu toka. Vertikalni tok odnosi se na perkolaciju od septičke jame do saturirane zone i kao rezultat dobivena je koncentracija onečišćenja na kraju vertikalnoga toka CVAD. Drugi se dio modela odnosi na horizontalno strujanje i pronos unutar saturirane zone, a kao rezultat dobivena je koncentracija onečišćenja na početku toka CSAT (inverzni postupak). Proračunom su definirane vrijednosti ukupnoga koeficijenta odumiranja ktot za obje faze toka. Višestruko veća vrijednost koeficijenta ukupnoga odumiranja dobivena je za vertikalnu dionicu toka (srednja vrijednost iznosi  $ktot = 8,25$ ) zbog utjecaja sorpcije na uklanjanje onečišćenja. Unutar saturirane zone koeficijent ukupnoga odumiranja ktot kreće se u granicama između 0,1 i 0,5. Definirani koeficijenti odumiranja pokazatelja fekalnoga onečišćenja, zajedno s izračunanim koncentracijama onečišćenja CVAD/CSAT, korišteni su kao ulazni podatak u numerički model pronosa onečišćenja. Numeričkim modelom dobiven je uvid u napredovanje oblaka onečišćenja.





ISBN 978-953-8168-35-2

