



Urednik  
**Stjepan Lakušić**

# IZAZOVI U GRADITELJSTVU 6

Hrvatski graditeljski forum 2022.



**Izdavač**

Hrvatski savez građevinskih inženjera  
Zagreb, Berislavićeva 6

**Urednik**

Prof. dr. sc. Stjepan Lakušić

**Tehnička urednica**

Tanja Vrančić

**Dizajn naslovnice**

minimum d.o.o.

**Prijelom**

Tanja Vrančić

**ISSN 978-953-6686-21-6**

Zagreb, studeni 2022.

*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.*



## IZAZOVI U GRADITELJSTVU 6

Urednik:  
Stjepan Lakušić



# Sadržaj

|    |  |     |
|----|--|-----|
| 1. | Novosti u provedbi stručnog nadzora<br>Lino Fučić .....  | 9   |
| 2. | Konstrukcijska obnova zgrada nakon potresa<br>Željko Uhlić .....   | 19  |
| 3. | Izrada projektno-tehničke dokumentacije za cijelovitu obnovu zgrada nakon potresa<br>Dragan Kovač, Mario Todorić .....   | 31  |
| 4. | Procjena stanja i obnova postojećih građevina - ARES projekt<br>Mišlav Stepinac .....  | 63  |
| 5. | Monitoring i analiza vibracija od prolaska tramvajskog vozila u svrhu zaštite zgrada oštećenih u potresu<br>Ivo Haladin, Stjepan Lakušić, Krešimir Burnać .....  | 93  |
| 6. | Izazovi koje nameću nove cijene građevnog materijala građevnog materijala<br>Ivica Završki .....   | 103 |
| 7. | Obrada građevnog otpada nastalog djelovanjem potresa<br>Nina Štirmer .....   | 109 |
| 8. | Korištenje pojedinih vrsta otpada kao sirovine u građevinskoj industriji<br>Dražen Vouk, Anđelina Bubalo, Domagoj Nakić, Nina Štirmer, Mario Šiljeg, Karlo Nad .....   | 137 |
| 9. | Važnost sinergije privrede i znanosti u povećanju održivosti zbrinjavanja otpada u okvirima kružnog gospodarstva<br>Dražen Vouk, Vjekoslav Majetić, Anđelina Bubalo, Morana Drušković, Sara Banovec, Nina Štirmer, Ivana Carević, Danica Maljković ..... | 157 |





## Novosti u provedbi stručnog nadzora

Autor:

Dr.sc. Lino Fučić

Hrvatska banka za obnovu i razvitak, Zagreb

## Novosti u provedbi stručnog nadzora

Lino Fučić

### Sažetak

Donošenjem novog pravilnika koncem 2021. godine, u način provedbe stručnog nadzora građenja unesene su neke promjene koje utječu na postupanje nadzornih inženjera. U radu se analiziraju najznačajnije novosti u provedbi stručnog nadzora i ukazuje se na nejasnoće, nepotpunosti ili neusklađenosti pravilnika s ostatkom građevno-tehničke regulative. Daje se i osvrt na novi koncept prikupljanja i vođenja dokumentacije na gradilištu. Predlažu se određena poboljšanja teksta pravilnika i rok u kojem bi ih trebalo provesti.

***Ključne riječi:*** pravilnik, stručni nadzor, nadzorni inženjer, dokumentacija na gradilištu

## News in the implementation of professional supervision

### Abstract

With the adoption of a new regulation at the end of 2021, some changes were made to the method of professional construction supervision that affect the actions of supervising engineers. The article analyzes the most significant innovations in the implementation of expert supervision and points out the ambiguities, incompleteness or inconsistency of the regulation with the rest of the construction and technical regulations. There is also a review of the new concept of collecting and keeping documentation on the construction site. Certain improvements to the text of the regulation and the deadline by which they should be implemented are proposed.

***Key words:*** regulation, professional supervision, supervision engineer, documentation on construction site

## 1 Uvod

Stručni nadzor i zadaće nadzornog inženjera su uvijek bile uređene zakonima koji uređuju gradnju. Međutim, razrada načina na koji se provodi stručni nadzor je uređena tek Zakonom o gradnji iz 2013. godine, koji Zakonom je ministar ovlašten donijeti odgovarajući podzakonski akt [1].

Taj je podzakonski akt donesen 2014. godine [2] i njime je propisan način na koji će nadzorni inženjer ispuniti zadaće koje mu određuje Zakon o gradnji.

Koncem 2021. godine, donesen je novi podzakonski akt [3] kojim je, zasad, podzakonski akt iz 2014. godine ostavljen u usporednoj primjeni s novim pravilnikom. Ključne promjene unesene u podzakonski akt iz 2021. godine odnose se na novo uređivanje načina prikupljanja i vođenja dokumentacije na gradilištu, no unesene su i neke promjene koje se odnose na provedbu stručnog nadzora građenja.

Oba podzakonska akta uređuju način provedbe stručnog nadzora u jednakim cjelinama:

- općim pravilima za provedbu stručnog nadzora, u kojima se uređuje prisutnost nadzornog inženjera na gradilištu, poznavanje projekata, propisa i pravila struke i u kojima se nadzornog inženjera upućuje da je dužan provesti i druge aktivnosti koje su (dodatno) propisane pravilnikom, tehnički propisi i Zakon o gradnji
- posebnim pravilima za provedbu stručnog nadzora, kojima se uređuje provjera ispunjavaju li izvođači i odgovorne osobe na gradilištu propisane uvjete, provedba kontrolnih postupaka i drugih provjera, mjere koje je nadzorni inženjer dužan poduzeti i način na koji izvještava investitora i mjerodavne inspekcije
- pravilima za izradu završnog izvješća nadzornog inženjera
- obveze koje nadzorni inženjer ima glede građevinskog dnevnika.

## 2 Provedba stručnog nadzora

Kako je izvorni pravilnik koji uređuje stručni nadzor iz 2014. godine već dugo vremena u primjeni, prikaz novosti u provedbi stručnog nadzora temeljit će se na prepostavki da je čitatelj dobro upoznat s dosadašnjim propisanim pravilima, te će se pozornost posvetiti samo značajnim promjenama koje donosi novi pravilnik iz 2021. godine.

### 2.1 Opća pravila

U nabranjanju dokumenata u odnosu na koje se provodi stručni nadzor radi osiguravanja da se građevina gradi u skladu s njima, u cijelom tekstu novog pravilnika iz 2021. dodan je i "projekt uklanjanja". Može se prepostaviti da je u praksi primjene izvornog pravilnika iz 2014. godine moglo doći do određene dvojbe primjenjuje li se pravilnik i na uklanjanje građevina. Premda se nalazi da je takva dvojba neopravdana (prema Zakonu o gradnji sve što se odnosi na građenje odgovarajuće se primjenjuje i na uklanjanje, ako nije posebno propisano nešto drugo), uvođenjem projekta uklanjanja u tekst propisa takva se dvojba definitivno otklanja. Ova promjena ne predstavlja nikakvu posebnu novost u provedbi stručnog nadzora.

Od ostalih novosti u ovom dijelu, u novom je pravilniku z 2021. godine ukinuta odredba koja se odnosila na korištenje prevoditelja u provedbi stručnog nadzora. S obzirom da je zakonom kojim se uređuju poslovi i djelatnosti u prostornom uređenju i gradnji [4] uređena obveza znanja i korištenja hrvatskog jezika stranim ovlaštenim osobama, odredba o korištenju prevoditelja je postala suvišna, a sama promjena ne utječe značajno na provedbu stručnog nadzora.

## 2.2 Posebna pravila

U dijelu u kojem novi pravilnik iz 2021. godine uređuje provjera ispunjavanja propisanih uvjeta za izvođače, unesena je promjena u odnosu na izvorni pravilnik iz 2014. godine koja se sastoji u tome da više nije definiran dokument kojim će izvođač dokazivati radnopravni status ovlaštene osobe (inženjera gradilišta, voditelja građenja ili voditelja radova). U tom smislu, može se očekivati da će u nekim slučajevima doći do prijepora između nadzornog inženjera i izvođača, je li dokument kojeg izvođač nudi kao dokaz dovoljan.

Što se tiče struke i ispunjavanja obveze položenog stručnog ispita za ovlaštene osobe izvođača, u odnosu na izvorni pravilnik iz 2014. godine u kojem je nadzorni inženjer trebao načiniti uvid u uvjerenje odnosno potvrdu o položenom stručnom ispitu, novi pravilnik iz 2021. godine upućuje nadzornog inženjera da načini uvid u "Registar o položenom stručnom ispitu". Rečeni Registar (još) nije uspostavljen jer novim pravilnikom nije uređeno tko vodi taj Registar i na koji način, te se stoga nadzorni inženjer može naći u poziciji da ne može provjeriti ispunjavaju li ovlaštene osobe izvođača propisane uvjete. Pri tome je nužno napomenuti da postoji "Registar izdanih uvjerenja o položenom stručnom ispitu" kojeg vodi nadležno ministarstvo, a koji Registar je uspostavljen temeljem pravilnika koji uređuje stručni ispit za poslove graditeljstva i prostornog uređenja [5]. U slučaju da je Registar na kojeg nadzornog inženjera upućuje novi pravilnik iz 2021. godine upravo "Registar izdanih uvjerenja o položenom stručnom ispitu", radi se o nepreciznosti novog pravilnika koja može izazvati određene dvojbe. Tome treba pridodati i da za podatke u "Registru izdanih uvjerenja o položenom stručnom ispitu" nije propisana njihova javna dostupnost, pa bi bila upitna pravna utemeljenost zahtjeva nadzornog inženjera za uvidom u taj Registar.

O ispunjavanju propisanih uvjeta osobe koja provodi iskolčenje građevine, novim je pravilnikom iz 2021. godine propisano da se isto može provjeriti, kao i prema izvornom pravilniku iz 2014. godine, uvidom u odgovarajuće rješenje Državne geodetske uprave. Uz to, dodano je da se provjera može načiniti i uvidom u evidencije Hrvatske komore ovlaštenih inženjera geodezije.

Što se tiče provedbe kontrolnih postupaka, za što je zadužen nadzorni inženjer, tekst izvornog pravilnika iz 2014. godine je u novom pravilniku iz 2021. godine znatno skraćen.

Izvorni pravilnik iz 2014. godine, članak 5., stavak 1, podstavak 1.:

“1. određivanjem kontrolnog tijela i, ako je to potrebno, određivanjem načina provedbe postupaka koji su posebnim propisom propisani kao kontrolni postupci odnosno koji su normama na koje upućuju propisi određeni kao kontrolni postupci koje provodi treća strana”

Novi pravilnik iz 2022. godine, članak 4., stavak 1., podstavak 1.:

“1. određivanjem kontrolnog tijela i, ako je to potrebno, određivanjem načina provedbe postupaka koji su posebnim propisima i normama propisani kao kontrolni postupci, koje provodi treća strana”

Iz usporedbe tekstova razvidno je da tekst u izvornom pravilniku iz 2014. godine jasno ističe razliku u izričaju iz hrvatskih tehničkih propisa (izričaj “kontrolni postupci”, koji je već u dugogodišnjoj uporabi u hrvatskom tehničkom vokabularu) i izričaju iz norma (koje, jer se radi o prihvaćenim europskim normama, za kontrolne postupke koriste izričaj “postupci treće strane”). Skraćivanjem teksta ta se jasnoča izgubila. Samo po sebi, to ne predstavlja problem, jer će rezultat biti isti: kontrolni postupak će provesti netko tko je nezavisan od investitora i od izvođača. Međutim, tekst novog pravilnika iz 2021. godine više ne uspostavlja jasnou granicu između “kontrolnih postupaka” koji se navode u tehničkim propisima i “postupaka treće strane” koji se navode u normama, što nadzornog inženjera koji nije dovoljno upoznat s ovim detaljima i izričajima može dovesti u dvojbu kako postupiti.

Drugi rezultat skraćivanja teksta je da novi pravilnik iz 2021. godine implicira da se normama nešto propisuje što je suprotno načelima europskog tehničkog zakonodavstva, kao i Zakonu o normizaciji [6], kojim je upućivanjem na odgovarajuću Uredbu [7] propisano da je “norma tehnička specifikacija ...s kojom sukladnost nije obvezna...” (članak 2. točka 1.Uredbe), te se stoga u hrvatskoj građevno-tehničkoj regulativi nikad ne navodi da norma nešto propisuje. Dodatni nered u građevinskoj tehničkoj vokabularu unose i uzance 69. i 70. Posebnih uzanci o građenju [8], prema kojima se kontrolna ispitivanja neispravno dijele na ona koja provodi izvođač (što je suprotno onome što je propisano građevno-tehničko regulativom) i na ona kontrolna ispitivanja koje za investitora provodi treća strana.

Iako su uzance autonomna regulativa, te stoga nisu obvezne ako se ne ugovore, sve ove nedosljednosti u izričajima i nazivu pojedinih aktivnosti koje se provode na gradilištu stavljuju nadzornog inženjera, ali i druge sudionike u gradnji pred nepotrebne izazove i dvojbe, a i moguće sporove.

Od drugih provjera koje provodi nadzorni inženjer, novim pravilnikom iz 2021. godine ukinuta je provjera je li izvođač proveo pripremu radova te gradi li (u cjelini) u skladu s odgovarajućim projektom. Razlog za ovu promjenu vjerojatno leži u činjenici da je novim pravilnikom iz 2021. godine uvedena nova odredba koja određuje nadzornom inženjeru obvezu da poduzme mjeru zabrane izvođenja radova za svaki slučaj u kojem se građenjem odstupa od odobrenog projekta, propisa, pravila struke itd.. Implicitno, takva odredba sugerira da je potrebno provjeravati gradi li izvođač u skladu s projektom.

Novi pravilnik iz 2022. godine, članak 4., stavak 1., podstavak 1.:

“(1) U provedbi stručnog nadzora građenja, nadzorni inženjer, u svrhu otklanjanja nepravilnosti građenja, zabranjuje izvođenje, odnosno nastavak izvođenja radova, zabranjuje vođenje građenja, odnosno vođenje pojedinih radova ako:

– izvođač koji izvodi radove ne izvodi radove u skladu glavnim projektom, koji je sastavni dio građevinske dozvole, glavnim projektom, izvedbenim projektom, tipskim projektom te projektom uklanjanja, Zakonom o gradnji, posebnim zakonima predmijevanim Zakonom o gradnji i pravilima struke”

Odredba novog pravilnika iz 2021. godine može izazvati poteškoće u provedbi stručnog nadzora jer nije dovoljno eksplicitna u smislu propisivanja načina kako se ova zadaća nadzornog inženjera provodi. Dodatno, nije vjerojatno da bi program kontrole i osiguranja kvalitete (sastavni dio glavnog projekta) sadržavao upute za pripreme za ugradnju nekog građevnog proizvoda, jer te upute daje proizvođač građevnog proizvoda. Prema tome, nadzorni inženjer više nije u obvezi nadzirati provodi li izvođač pripremu na potreban način, obzirom da takav sadržaj glavni projekt ne sadrži.

U dijelu obveza nadzornog inženjera da investitora i mjerodavne inspekcije obavijesti o poduzetim mjerama, u samom tekstu novog pravilnika iz 2021. godine nije načinjena nikakva izmjena u odnosu na tekst izvornog pravilnika iz 2014. godine. Međutim, već spomenuta promjena o mjeri zabrane izvođenja radova za bilo kakvo odstupanje od npr. glavnog projekta koji je sastavni dio građevinske dozvole čini za ovu obavijest vrlo značajnu promjenu u odnosu na izvorni pravilnik iz 2014. godine.

## 2.3 Završno izvješće nadzornog inženjera

Kada se radi o izradi završnog izvješća nadzornog inženjera, novim pravilnikom iz 2021. godine ukinuta je obveza primopredaje dokumentacije između nadzornog inženjera koji više ne provodi nadzor neke građevine/radova i nadzornog inženjera koji preuzima nadzor. S obzirom na novi pristup uređivanju prikupljanja dokumentacije na gradilištu (što je uređeno istim pravilnikom), a koji pristup bi trebao garantirati da je sva ta dokumentacija dostupna i pohranjena, ukidanje ove obvezе ne bi trebalo imati osobiti utjecaj na provedbu stručnog nadzora. Ono što, međutim, zбуњuje je da je u člancima 24. i 25. novog pravilnika iz 2021. godine, u kontekstu izrade završnog izvješća nadzornog inženjera, zadržana obveza navođenja podataka o primopredaji dokumentacije, pa to može izazvati određene dvojbe nadzornih inženjera pri izradi završnog izvješća. Od novih sadržaja izvješća, novim je pravilnikom iz 2021. godine uvedena obveza navođenja podatka o usklađenosti geodetskog snimka izvedenog stanja s glavnim projektom.

U pregledu mjera zabrane izvođenja radova, novim je pravilnikom iz 2021. godine ukinuta odredba koja se odnosila na zabranu izvođenja radova u slučaju neispravnosti povezanih s iskolčenjem građevine. Razlog za ovo ukidanje leži u činjenici da je tim pravilnikom propisano da, u slučaju da osoba koja je provela iskolčenje ne ispunjava propisane uvjete, nadzorni inženjer neće odobriti početak građenja odnosno otvaranje građevinskog dnevnika. Ovakvo uređivanje postupka iskolčenja građevine može prouzročiti dva problema za koje se u novom pravilniku iz 2021. godine ne nalazi odgovarajuće rješenje.

U slučaju da je iskolčenje provela osoba koja ispunjava propisane uvjete, a ipak se utvrdi da je iskolčenje pogrešno izvedeno, nadzorni inženjer nema mogućnosti zabraniti izvođenje radova dok se ta nepravilnost ne otkloni. Nadalje, za slučaj kada je – da bi se provelo iskolčenje građevine – potrebno izvesti neke pripremne radove (npr. iskrčiti šumu), nadzorni inženjer neće biti u mogućnosti odobriti početak građenja i otvaranje građevnog dnevnika jer iskolčenje nije provedeno. S druge strane, novi pravilnik iz 2021. godine izričito propisuje (članak 13.) da se građevinski dnevnik vodi od dana početka pripremnih radova.

Daljnja novost među mjerama zabrane izvođenja radova odnosi se na već spomenuti članak 4., stavak 1., podstavak 1. novog pravilnika iz 2021. godine, prema kojem je nadzorni inženjer u obvezi zabraniti izvođenje radova za bilo kakvo odstupanje od projekata, propisa, pravila struke i sl. S obzirom da odredba navodi zabranu izvođenja radova i za odstupanje od glavnog projekata koji je sastavni dio građevinske dozvole, može se očekivati značajne poteškoće na gradilištima na kojima se primjenjuje članak 106.a Zakona o gradnji, prema kojem se građevina smije graditi i po izmijenjenom glavnom projektu prije ishođenja izmjene i dopune građevinske dozvole. Kako se u tom slučaju evidentno radi o odstupanju od glavnog projekta koji je sastavni dio građevinske dozvole, sudionici u gradnji se mogu naći u značajnom problemu primjenom ove odredbe novog pravilnika iz 2021. godine.

Na kraju razmatranja zabrane izvođenja radova, skreće se pozornost na to da u novom pravilniku iz 2021. godine nema više odredbe prema kojoj je nadzorni inženjer mogao ukinuti prethodno poduzetu mjeru zabrane radova kada je do zabrane došlo zbog toga što izvođač ili njegova ovlaštena osoba ne ispunjavaju propisane uvjete. Prema novom pravilniku iz 2021. godine, u slučaju kada bi nadzorni inženjer zabranio izvođenje radova iz tih razloga, a izvođač bi naknadno otklonio tu nepravilnost, više nema odredbe sukladno kojoj bi se zabrana izvođenja radova mogla ukinuti.

## 2.4 Obveze glede građevinskog dnevnika

Načelno se može reći da glede obveza u vezi građevinskog dnevnika ima dosta promjena, koje su prouzročene promjenom načina vođenja građevinskog dnevnika (prestanak vođenja dnevnika u analognom i početak vođenja u digitalnom obliku).

Među obvezama glede građevinskog dnevnika, najveća novost koju je uveo novi pravilnik iz 2021. godine jest da se građevinski dnevnik može otvoriti tek po dopuštenju nadzornog inženjera. Ostale novosti koje mogu imati utjecaja na provedbu stručnog nadzora su:

- uvođenje mogućnosti da se dijelovi građevinskog dnevnika mogu voditi po "ugovornom izvođaču" (članak 14., stavak 1, podstavak 3.); kako niti Zakonom o gradnji [1], a niti novim pravilnikom iz 2021. godine [3] nije definirano tko je "ugovorni izvođač", ostaje pitanje kako će se provoditi ova odredba,
- propisivanje da "Građevinski dnevnik vodi inženjer gradilišta i/ili voditelj radova u svojstvu osobe koja vodi građenje." (članak 15., stavak 3.); kako zakonom kojim se uređuju poslovi i djelatnosti u prostornom uređenju i gradnji [4] nije predviđeno da bi voditelj radova mogao voditi građenje, i za ovu odredbu je nejasno kako će se provoditi,

Novi pravilnik iz 2022. godine, članak 19., stavak 3.:

“Glavni inženjeri, inženjeri gradilišta i voditelji radova, koji nisu članovi komore, a prema posebnom zakonu mogu biti osobe koje vode građenje potpisuju se kvalificiranim elektroničkim potpisom (poslovna kartica s potpisnim i identifikacijskim certifikatom), koji mora sadržavati OIB ovlaštenog inženjera odnosno arhitekta.”

- odredba članka 19. stavka 3. novog pravilnika iz 2021. godine koja određuje da odgovorne osobe izvođača koji nisu članovi odgovarajuće strukovne komore građevinski dnevnik potpisuju kvalificiranim elektronički potpisom s OIB-om ovlaštenog inženjera odnosno ovlaštenog arhitekta; kako se tek članstvom u komori stječe pravo na strukovni naziv ovlaštenog inženjera odnosno arhitekta [9], proizlazi da je ova odredba neprovediva.

### 3 Obavljanje drugih poslova

Odredba izvornog pravilnika iz 2014. godine kojom je uređeno obavljanje drugih poslova nadzornog inženjera, u novom je pravilniku iz 2021. godine skraćena.

Izvorni pravilnik iz 2014. godine, članak 11., stavak 1.:

“(1) Osim poslova obavljanja stručnog nadzora, nadzorni inženjer smije obavljati i druge poslove koje mu ugovorom povjeri investitor (poslove tehničkog savjetovanja, kontrole ispunjavanja ugovornih obveza izvođača radova prema naručitelju i poduzimanja odgovarajućih mjera za realizaciju tih obveza, poslove obračunavanja izvedenih radova i sl.).”

Novi pravilnik iz 2022. godine, članak 10., stavak 1.:

“(1) Osim poslova obavljanja stručnog nadzora, nadzorni inženjer smije obavljati i druge poslove koje mu ugovorom povjeri investitor u skladu s propisima.”

Usporedbom teksta izvornog pravilnika i novog pravilnika uočava se da investitor može nadzornom inženjeru povjeriti obavljanje bilo kojih poslova koje, u skladu s propisima, nadzorni inženjer smije (osim stručnog nadzora) obavljati. Zbunjujuće u odredbi novog pravilnika iz 2021. godine je da nije vjerojatno da postoji bilo koji drugi propis koji bi određivao poslove nadzornog inženjera osim Zakona o gradnji (i pratećih zakona te podzakonskih akata), a ta skupina građevno-tehničke regulative kao jedini posao nadzornog inženjera uređuje poslove provedbe stručnog nadzora.

### 4 Obavijest investitoru o nepravilnostima u glavnom projektu

Iako je tema obavještavanja investitora o nepravilnostima i nedostacima u građenju već prethodno obrađena, obavještavanje investitora o nepravilnostima i nedostacima glavnog projekta (s obzirom da se ne radi o građenju) zaslužuje posebno razmatranje.

Naime, ta zadaća nadzornog inženjera iz članka 50., stavak 1., podstavak 5. Zakona o gradnji [1] (koja nije postojala u zakonima koji su prethodili Zakonu o gradnji iz 2013. godine) nije razrađena ni u izvornom pravilniku iz 2014. godine, niti u novom pravilniku iz 2021. godine.

Kako se radi o vrlo upitnoj odredbi Zakona, jer unosi nered u inače vrlo precizno definirane odgovornosti sudionika u gradnji (i koji su kao takvi preneseni i u Zakon o obveznim odnosima [10]), najbolje rješenje bi bilo da se odredba briše iz Zakona o gradnji i nadzornom inženjeru ostave samo odgovornosti zbog kojih je i prepoznat kao zasebni sudionik u gradnji – a to je da svojim djelovanjem osigura da se određena građevina izgradi sukladno odobrenom projektu. Ako se ipak ne želi odustati od ove odredbe, nužno je u novi pravilnik iz 2021. [3] godine dodati odredbe kojim će urediti način provedbe ove zadaće nadzornog inženjera.

## 5 Osvrt na koncept nazvan “eGrađevinski dnevnik”

Iako tema koncepta postupanja s dokumentacijom na gradilištu koji je novim pravilnikom iz 2021. godine [3] nazvan “eGrađevinski dnevnik” prelazi okvire ovoga rada, povezanost nadzornog inženjera s građevinskim dnevnikom i značajne promjene koje se uvode novim pravilnikom iz 2021. godine u vezi građevinskog dnevnika zaslužuju da se razmotre.

Naime, onime što je uređeno novim pravilnikom iz 2021. godine teži se tome da se informatičkim alatom u jednu cjelinu poveže sva dokumentacija koju izvođač mora imati na gradilištu. Sam po sebi, koncept nije pogrešan, no uvođenjem naziva “eGrađevinski dnevnik” za svu dokumentaciju građenja pojedini dokumenti uklapanjem u eGrađevinski dnevnik gube svoju samostalnost i integritet. Npr. građevinska dozvola koja egzistira kao samostalni upravni akt kojeg je izdalo državno tijelo i koja kao svoj sastavni dio sadrži glavni projekt po kojem se treba izgraditi građevina, postaje sukladno novom pravilniku iz 2021. samo jedan od dijelova eGrađevinskog dnevnika kojeg vodi gospodarski subjekt – izvođač.

S time u vezi, poštujući smisao vođenja građevinskog dnevnika koja proizlazi iz hrvatske graditeljske tradicije, a koji smisao je obuhvaćen definicijom da je, citat: “Građevinski dnevnik (engl. *daily progress record*, *daily diary*, njem. *Baujournal*, n., *Bautagebuch*, n.), osnovni dokument za građevinu kojim se prati proces građenja.” [11] nalazi se potrebним sugerirati dvije stvari:

- da se umjesto naziva “eGrađevinski dnevnik” koncept informatizacije dokumentacije koju izvođač mora imati na gradilištu zamjeni s nazivom “eDokumentacija na gradilištu” ili “eDokumentacija građenja”, pri čemu će eGrađevinski dnevnik biti samo jedan dokument s vrlo jasnom ulogom da se u njega bilježe ključne aktivnosti, njihovi rezultati i komunikacija sudionika u gradnji tijekom građenja, te
- da se cijela ta tematika izdvoji u zasebni podzakonski akt, jer i građevinski dnevnik i dokumentacija na gradilištu predstavljaju zasebnu temu u odnosu na provedbu stručnog nadzora.

## 6 Zaključak

Kako je pokazano u radu, novim pravilnikom iz 2021. godine u provedbu stručnog nadzora unesene su neke novosti koje mogu izazvati nejasnoće u provedbi stručnog nadzora, u nekim dijelovima je pravilnik manjkav, a u nekim čak i suprotan odredbama drugih zakona i propisa koji su sastavni dio građevno-tehničke regulative.

U cilju uspješne implementacije novog pravilnika iz 2021. godine, kao i unapređenja provedbe stručnog nadzora koje je vjerojatno bio cilj uvedenih promjena, preporuča se otkloniti nedostatke novog pravilnika iz 2021. godine bez odgode, a svakako prije početka njegove obvezne primjene 1.1.2023. godine.

## Literatura

- [1] Zakon o gradnji, "Narodne novine" broj 153/13, 20/17, 39/19, 125/19
- [2] Pravilnik o načinu provedbe stručnog nadzora građenja, obrascu, uvjetima i načinu vođenja građevinskog dnevnika te o sadržaju završnog izvješća nadzornog inženjera, "Narodne novine" broj 111/14, 107/15, 20/17, 98/19, 121/19
- [3] Pravilnik o načinu provedbe stručnog nadzora građenja, uvjetima i načinu vođenja građevinskog dnevnika te o sadržaju završnog izvješća nadzornog inženjera, "Narodne novine" broj 131/21, 68/22
- [4] Zakon o poslovima i djelatnostima prostornog uređenja i gradnje, "Narodne novine" broj 78/15, 118/18, 110/19
- [5] Pravilnik o stručnom ispitovanju osoba koje obavljaju poslove graditeljstva i prostornoga uređenja, "Narodne novine" broj 129/15
- [6] Zakon o normizaciji, "Narodne novine" br. 80/13
- [7] Uredbe (EU) broj 1025/2012 Europskoga parlamenta i Vijeća o europskoj normizaciji, "Službeni list Europske Unije", L 316/12
- [8] Posebne uzance o građenju, "Narodne novine" br 137/21
- [9] Zakon o komori arhitekata i komorama inženjera u graditeljstvu i prostornom uređenju, "Narodne novine" broj 78/15, 114/18, 110/19
- [10] Zakon o obveznim odnosima, "Narodne novine" br. 35/05, 41/08, 125/11, 78/15, 29/18, 126/21, 114/22
- [11] Simović, V. (urednik): Leksikon građevinarstva, Masmedia, 2002.



## Konstrukcijska obnova zgrada nakon potresa

Autor:  
Mr.sc. Željko Uhlir

Ministarstvo prostornoga uređenja, graditeljstva i državne imovine,  
Zagreb

## Konstrukcijska obnova zgrada nakon potresa

Željko Uhlić

### Sažetak

Obnova zgrada dva snažna potresa koji su se 2020. godine desili u Republici Hrvatskoj, velik su i složen organizacijski, inženjerski i finansijski projekt. Uspješnost realizacije takvog projekta ovisi o ispunjenju nekoliko osnovnih preduvjeta. Iskustva diljem svijeta, a posebno domaća iskustva su dovoljno velika kako se nepotrebne pogreške ne bi ponavljale, i kako bi poslije svake obnove fundus znanja o toj temi bio sve bogatiji. Uz nužno uvažavanje lokalnih specifičnosti, u ovom radu daju se preporuke za uspješno upravljanje projektom obnove nakon katastrofe, s naglascima specifičnim za konstrukcijsku obnovu zgrada nakon potresa.

*Ključne riječi:* upravljanje projektom obnove nakon katastrofe, obnova zgrada, potres

### Structural reconstruction of buildings after an earthquake

#### Abstract

The reconstruction of buildings after two strong earthquakes that occurred in the Republic of Croatia in 2020, is a large and complex organizational, engineering and financial project. The success of the implementation of such a project depends on the fulfillment of several basic prerequisites. Experiences around the world, and especially domestic experiences, are vast enough to prevent mistakes from being repeated, and after each reconstruction, knowledge on the subject is even greater. With the necessary respect for local specificities, this paper provides recommendations for successful post-disaster reconstruction project management, with specific emphasis on the structural reconstruction of buildings after an earthquake.

*Key words:* post-disaster reconstruction project management, reconstruction of buildings, earthquake

## 1 Uvod

Različite elemenarne nepogode, a posebno potresi i poplave ili ratna razaranja, predstavljaju značajne opasnosti za koje se potrebno adekvatno pripremati. Opasnost je definirana kao *opasna pojava, tvar, ljudska aktivnost ili stanje koje može uzrokovati gubitak života, ozljedu ili druge utjecaje na zdravlje, oštećenje imovine, gubitak sredstava za život i usluga, društveni i ekonomski poremećaj ili štetu okolišu* [1]. Potres pripada skupini prirodnih rizika koji se ne mogu predvidjeti, a s određenom se vjerojatnošću mogu dogoditi u bilo kojem trenutku [2].

Zgrade koje su građene u novije vrijeme, odnosno nakon što su u doneseni propisi koji osiguravaju primjerenu mehaničku otpornost i stabilnost konstrukcije, ne bi trebale pri maksimalnim očekivanim intenzitetima potresa doživjeti znatnija oštećenja. Međutim, za starije zgrade, a posebno za one u centru glavnog grada, Zagreba, koje nisu bile niti projektirane niti građene kako bi izdržale dinamička (potresna) opterećenja, postoji velika vjerojatnost da bi se prilikom očekivanog jačeg intenziteta potresa mogla desiti razorna oštećenja s velikim žrtvama [3].

Dva snažna potresa koja su se desila 2020. godine u Republici Hrvatskoj (u Zagrebu i Petrinji), prouzrokovala su jaka oštećenja starijih zgrada i podsjetila su sve strukture društva da se naša država nalazi na trusnom području s mogućim razornim potresima.

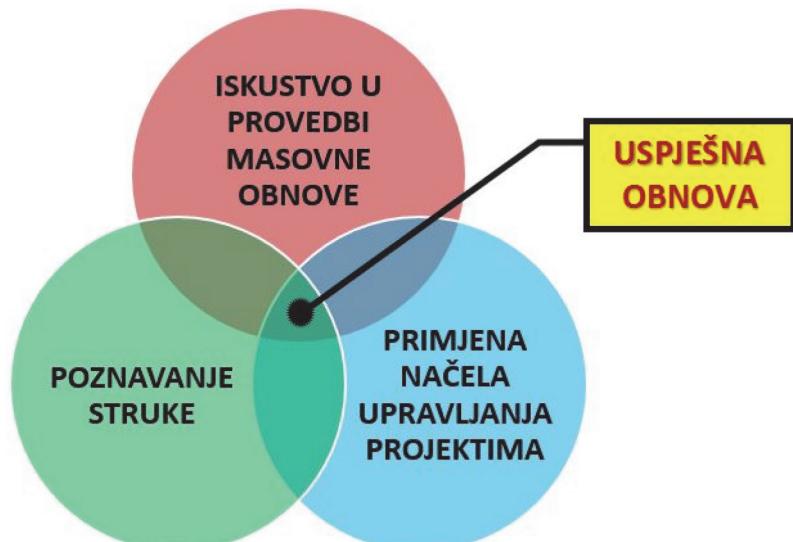
## 2 Upravljanje projektom obnove zgrada nakon katastrofe

**Obnova zgrada nakon elementarnih nepogoda ili ratnih razaranja, velik su i složen organizacijski, inženjerski i finansijski projekt. Kriza može postati katastrofa, ali i katastrofa može postati kriza, ako se s njom ne upravlja učinkovito** [4]. Iz organizacijskog aspekta, uspješno upravljanje projektom obnove ovisi o ispunjenju nekoliko osnovnih preduvjeta (slika 1.):

- Iskustvo u provedbi masovne obnove
- Primjena načela upravljanja projektima
- Poznavanje struke.

### 2.1 Iskustvo u provedbi masovne obnove

Ključna karakteristika po kojoj se uvjeti obnove nakon katastrofe razlikuju od uobičajenih uvjeta gradnje je **kompresija vremena** [5]. Potrebno je voditi računa o stradalnicima – ljudima koji su pogođeni katastrofom i pate zbog svega što su pretrpjeli. Neki su možda raseljeni i/ili žive u substandardnim uvjetima. Očekivanja stradalnika su velika od predstavnika vlasti. Stradanja i patnje ljudi senzibiliziraju javnost i pojačavaju odgovornost. Posebno je potrebno ubrzati sve procese ukoliko su zgrade djelomično oštećene kako bi se spriječila daljnja šteta ili ugroza ljudi. Kod potresa ne treba zaboraviti da se utjecaj svih sljedećih potresa koji slijede nakon primarnog udara, akumulira u zgradama. Osim toga, vjerojatnost pojave novog razornog potresa nije poznata. Isto tako utjecaj atmosferilija izrazito negativno djeluje na strukturu oštećenih zgrada i doprinosi dalnjim oštećenjima.



Slika 1. Preduvjeti za uspješno upravljanje projektom obnove

Stoga je u provedbi masovne obnove ključno primijeniti **načelo 4R** (engl. *Rapid Response, Rapid Repairs*) [6]. Brzi odgovor i brza obnova podrazumijevaju: brzo uspostavljanje organizacije za provedbu projekta obnove i uvođenje hitnih mjera pomoći, kraćenje svih redovnih i dugih procedura za utvrđivanje prava uz uvažavanje osnovnih načela, kraćenje svih procedura za izradu projektne dokumentacije uz uvažavanje osnovnih načela, pojednostavljenje masovnog ugovaranja radova i usluga uz naglašenu transparentnost, kao i brzo aktiviranje izvanrednog legalnog okvira za postupanje [5, 6, 7, 8, 9]. U obnovi nakon poplave u Slavoniji (2014.) postignut je rekord u obradi zahtjeva za obnovu, tako da je od podnošenja zahtjeva do isplate pomoći ili zaduženja operativnog tijela za obnovu prošlo svega 4 (četiri) radna dana [8].

**Ključni trenutak je odluka o brzom djelovanju i jasnim ciljevima uz snažnu političku potporu** [9, 10]. Neposredno nakon velike poplave (2021.) u SR Njemačkoj donesena je odluka: Građanima treba pomoći *brzo, obilato i bez birokratiziranja* (njem. *schnell, großzügig und unbürokratisch*) [11]. Slijedio je brzi plan obnove i osiguranje 30 mlrd. EUR za obnovu kuća i infrastrukture.

Uz brojna iskustva uspješno provedenih obnova, postoje naravno i ona od nesuspješnih, a uvjek je bolje učiti na tuđim pogreškama nego na svojim. Osim toga, potrebno je kritički promatrati strane modele i uz uvažavanje lokalnih posebnosti prilagoditi primjenu. Ključni utjecaji u formirajućem modelu obnove jesu: stupanj razvijenosti države i građanskih odnosa, te socijalni status stradalih. Npr. u snažnije razvijenim državama, s efikasnim pravnim okvirom, te visoko uređenim poslovnim odnosima, uz građane koji tradicionalno brinu o svojoj imovini tako da ju osiguravaju, a grade uz sve formalnosti, uloga državne uprave može biti smanjena, dok u suprotnim situacijama državna uprava mora biti aktivnija. Raspon modela obnove kreće se od samoobnove vlasnika do pot-

pune obnove od strane državne uprave, uz mogće kombinacije, a svaki model ima svoje prednosti i mane koje treba pažljivo sagledati [12]. Svaka uspješna obnova mogla bi biti još bolja i zato je nužno kontinuirano prikupljati znanja. Jedan od primjera neuspjeha u obnovi nakon snažnog potresa (2011.) u Christchurchu izražen je u dvije točke [13]:

- Obnova je trajala previše dugo i građani su se trajno raselili.
- Diktirani su novi sadržaji u obnovi grada, a koje građani nisu prihvatali.

## 2.2 Primjena načela upravljanja projektima

Ne treba zaboraviti da je i organizacija obnove stručan posao, a ne samo obnova u građevinsko-konstrukcijskom smislu. Projekti obnove nakon katastrofa uobičajeno **sadrže brojne nepoznanice i iznimnu kompleksnost** tako da su kašnjenja i probijanja troškova česta pojava [14]. Mnogi projekti obnove nisu bili uspješni upravo zbog lošeg upravljanja projektom, jer ključno osoblje nije imalo osnovne kompetencije iz područja upravljanja projektima [15].

Osnove upravljanja projektima podrazumijevaju poznavanje sljedećih pet procesa u životnom vijeku projekta [4]: iniciranje, planiranje, izvođenje, praćenje/kontrola i zatvaranje. U obnovi je za te procese potrebno ustaviti primjerene procedure. Osim poznavanja navedenih procesa, nužno je kvalitetno ekipiranje i vođenje.

Kako bi voditelj projekta uspio kvalitetno provoditi svoje zadatke, potrebne je da posjeduje kompetencije za takav posao: znanje, vještine i sposobnosti, stjecane na sličnim projektima [16]. Upravo znanje i iskustvo omogućavaju voditelju projekta donošenje kvalitetnih i brzih odluka, odnosno uputa, u nesigurnim/promijenjivim uvjetima.

Jedan od preduvjeta uspješnog upravljanja projektom obnove je **jasna linija zapovijedanja i brzo donošenje odluka**. Prilikom postavljanja organizacije obnove, potrebno je poznavati sve prednosti i mane pojedinog organizacijskog oblika upravo zbog jasne linije zapovijedanja i optimizacije provedbenih procesa. Ovisno o okruženju u kojem se treba provesti obnova, moguće je istu organizirati: povećanjem kapaciteta nadležnog ministarstva, osnivanjem vladine agencije ili kombinacijom [17]. Kako bi se ubrzali postupci obnove infrastrukture, u Japanu su primijenili metodologiju upravljanja kritičnim lancima i postavili cilj – donošenje odluka u jednom danu [6]. Naravno, preduvjet za takav cilj je kompetentno osoblje.

## 2.3 Poznavanje struke

Obnova nakon katastrofe zahvača brojna stručna područja. Nakon određivanja prioriteta, s njima treba biti uskladjena i struka voditelja projekta. Ukoliko su prioriteti brza konstrukcijska obnova/nova gradnja i povratak građana u svoje domove, tada su za vodeće osobe u projektu nužna znanja iz područja graditeljstva. Zašto je tome tako, odgovor je trivijalan – da bi se uopće razumijeli dionici projekta, i to kako na strateškoj, tako i operativnoj razini.

### 3 Konstrukcijska obnova zgrada

Za potrebe obnove zgrada nakon potresa napravljen je pravni okvir sa Zakonom o obnovi zgrada oštećenih potresom na području grada Zagreba, Krapinsko-zagorske županije, Zagrebačke županije, Sisačko-moslavačke županije i Karlovačke županije (NN 102/20, 10/21, 117/21) (Zakon o obnovi) i pripadnim podzakonskim aktima, koji su u cjelini trebali omogućiti skraćivanje svih procedura i efikasniju provedbu obnove. Zakon o obnovi uveo je nove pojmove, sudionike i klasifikaciju postupaka koji su specifični za obnovu nakon potresa. Tako razlikujemo: **vrstu, način i razinu obnove zgrada** (slika 2.).

#### **VRSTA OBNOVE**

---

- a) SAMOOBNOVA**
- b) ORGANIZIRANA OBNOVA**

#### **NAČIN OBNOVE**

---

- a) HITNE MJERE ZAŠTITE ZGRADA**
- b) KONSTRUKCIJSKA OBNOVA**
- c) CJELOVITA OBNOVA**
- d) GRADNJA ZAMJENSKE OB. KUĆE**

#### **RAZINE OBNOVE**

---

##### **Razine obnove (ojačanja konstrukcije) od 1- 4**

Slika 2. Klasifikacija postupaka obnove

Pravilnik o sadržaju i tehničkim elementima projektne dokumentacije obnove, projekta za uklanjanje zgrade i projekta za građenje zamjenske obiteljske kuće oštećenih potresom na području Grada Zagreba, Krapinsko-zagorske županije i Zagrebačke županije (NN 127/20), propisao je što treba sadržavati projektna dokumentacija koja je objedinila elemente glavnog i izvedbenog projekta. Osim toga, obvezni dio projektne dokumentacije je i Elaborat ocjene postojećeg stanja građevinske konstrukcije, u kojem građevinar konstruktor opisuje zatećeno stanje i daje svoje preporuke za obnovu. Kako bi slika zatećenog stanja konstrukcije bila što mjerodavnija za daljenje zahvate obnove, obvezan element projekta je i prethodno ispitivanje kakvoće postojećih konstrukcijskih elemenata. Razine obnove (I-IV), odnosno ojačanja konstrukcija definirane su Tehničkim propisom za građevinske konstrukcije (NN 17/17, 75/20, 7/22), i razlikuju se ovisno o razini oštećenja (I-V) i društvenoj važnosti zgrade (I-IV), dok je detaljan opis radova ovisno o načinu i razini obnove, propisan u Programu mjera (NN 88/22).

S obzirom na masovnu obnovu i financiranje od strane države, uspostavljena je i posebna kontrola nad izradom projekata koju provodi ugovorena tvrtka za tehničko-financij-

sku kontrolu (TFK). TFK u naravi zamjenjuje investitora u pregledu projekata i kontrolira primjerenost i racionalnost tehničkih rješenja u obnovi, kao i projektno pridržavanje propisanih prava u obnovi. Potreba za takvom vrstom kontrole prepoznata je još za vrijeme masovne obnove nakon Domovinskog rata [7]. Ključna uloga TFK je u postizanju racionalne obnove, ali ima i savjetodavnu ulogu s obzirom na brojne izazove koje u obnovu unose različiti konstrukcijski sklopovi, različiti materijali za sanacije i u ostalom različiti izvorni nedostaci starih zgrada koji u obnovi dolaze do izražaja. Nužna pretpostavka je da TFK ima u svojem sastavu djelatnike koji posjeduju stručni autoritet na temelju dokazanih stručnih kompetencija.

**Konstrukcijska obnova zgrada nakon potresa predstavlja najveći izazov u obnovi.** Među različitim tipovima zgrada, one višestambene u centru glavnoga grada, Zagreba, predstavljaju posebno kompleksan zadatku u obnovi. Treba znati da su predmet obnove samo zgrade koje nisu bile niti projektirane niti građene kako bi izdržale dinamička (potresna) opterećenja, tako da su poprimile znatnija oštećenja u zadnjim potresima. S obzirom da je većina višestambenih zgrada umjerenog do teško oštećena, potrebno je brzo reagirati kako ne bi nastala dodatna nepotrebna oštećenja i ugroza za zdravlje i život ljudi.

Ukupno stanje starih oštećenih zgrada je ozbiljno konstrukcijski narušeno, uglavnom zbog činjenice da je i ono malo potresne otpornosti koju su te zgrade imale, potrošeno u zadnjim potresima. Pri tome poznato je da se učinak potresa na zgradama akumulira i pri svakom sljedećem one su sve slabije. Posebno je problematičan vezivni mort između opeka u tim zgradama s obzirom da je on uglavnom vrlo oslabljenih svojstava. To je vidljivo iz ispitivanja na posmičnu čvrstoču koja se provode u okviru Elaborata ocjene postojećeg stanja građevinske konstrukcije. Ilustrativna je i fotografija koja je nastala neposredno nakon potresa, i na kojoj se vidi oblak prašine nad centrom grada Zagreba (slika 3.). Ta prašina je nastala iz žbuke i morta koji je uslijed gibanja zidova istisnut iz fuga.



Slika 3. Pogled na Zagreb neposredno nakon potresa i oblak prašine nad centrom grada

Još uvijek se i vizualnim pregledom oštećenih zgrada u samom centru grada Zagreba mogu vidjeti opasni nestabilni elementi koji upućuju na potrebnu žurnost obnove (slike 4. i 5.). Osim naknadnih potresa, od manjih do razornih, koji se mogu desiti bilo kada, zgrade su izložene štetnom utjecaju atmosferilija. **S odmakom vremena od nastanka oštećenja do obnove, ta dva utjecaja postaju sve značajniji za nestabilnost elemenata zgrade.** Ukoliko prođe dulje vrijeme i izmjenjuju se navedeni utjecaji, moguća je ugroza konstrukcije u tolikoj mjeri da dođe do naknadnog urušavanja.



Slika 4. Oštećenje nadvoja iz opeke



Slika 5. Oštećenje zabatnog zida

Za potrebe konstrukcijske obnove, profesori s Građevinskog fakulteta iz Zagreba, kao i profesori s drugih građevinskih fakulteta i stručnjaci iz Hrvatske komore građevinskih inženjera, u rekordnom su vremenu izradili priručnik za potresnu obovu zgrada [18]. Takav priručnik bio je potreban s obzirom da većina građevinara konstruktora u svojoj praksi nisu imali prilike raditi na sanacijama starih zgrada i njihovim konstrukcijskim specifičnostima.

Posebno su vrijedni doprinosi provedenih i objavljenih istraživanja ojačanja nosivih elemenata. Jedno takvo istraživanje provedeno je od Finske istraživačke ustanove VTT. Glavni cilj javno objavljenog izvješća VTT-a [19] bio je prikazati sažetak tehnika sanacije zidova primijenjenih u potresnim područjima. Dokument pokušava dati pregled mogućih metoda sanacije, njihova područja primjene, njihovu učinkovitost i ekonomsku izvedivost. Na Građevinskom fakultetu u Osijeku objavljena je također interesantna analiza nekoliko provednih istraživanja pod naslovom - Ojačanje povijesnih građevina kompozitnim polimerima [20].

Osim brojne domaće i inozemne stručne literature iz područja potresnog inženjerstva, za razumijevanje potresnog djelovanja na građevine, kao i s preporukama za sanaciju, izdan je 1988. godine kvalitetan zbornik radova: Potresno građevinarstvo [21]. Za taj zbornik radove su napisali brojni stručnjaci i dva doajena potresnog inženjerstva: prof. dr. R. Rosman – Seizmički dizajn konstrukcija visokogradnje, i prof. dr. D. Aničić – Sanacija i ojačanje zidanih konstrukcija.

Povijesni dokument koji je mogao znatno umanjiti štete od potresa - **Djelovanje potresa na zgrade**, predavanje je prof. dr. Andrije Mohorovičića iz 1909. godine, koje na 79 stranica detaljno tekstualno i numerički opisuje djelovanje potresa na zgrade, te daje preporuke za konstrukcijsko oblikovanje kako bi zgrade u budućnosti bile otpornije na utjecaje potresa [22]. Nažalost, njegove preporuke **nisu dobile pravovremenu formu propisa** i zgrade koje su se gradile do sredine 20. st. uglavnom nisu slijedile te preporuke koje su i danas aktualne, te usporedive sa suvremenim propisima (slika 6.) [23].

Uz svu suvremenu literaturu, kao i povijesnu, te razmjenu znanja između stručnjaka – građevinara konstruktora, struci su na raspolaganju i suvremeni programski paketi za proračun konstrukcija s kojima se mogu modelirati zgrade i njihovo ponašanje u potresu. Ipak, za kvalitetnu obnovu starih višestambenih zgrada, **potrebno je dubinsko razumijevanje ponašanja njihove konstrukcije**. Na konstruktorma leži velika odgovornost kako bi se te stare zgrade ispravno ojačale i pripremile za buduće potrese.

Osim razumijevanja konstrukcija i starih načina gradnje, potrebno je i poznavanje novih materijala za sanacije i ojačanja, koji ukoliko se ispravno primjenjuju mogu znatno doprinijeti nosivosti konstrukcijskih elemenata (slika 7.). U tom kontekstu sve češće se na gradilištima osim konstruktora nalaze i tehnolozi.

| Preporuke, Mohorovičić (1909.–1911.):  | Eurokod-8 (2003.):   |
|--|--|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Na strmini, a osobito na gornjem rubu jake strmine neka se uopće ne gradi.</li> <li>2. Pomno ispitati zemljiste, ako treba umjetno ga pojačati.</li> <li>3. Temelji zgrade neka su tako jaki i debeli, da bude pritisak na zemlju po jedinici plohe, po mogućnosti malen.</li> <li>4. Temelj zgrade neka je po mogućnosti monolit napravljen od betona (...) koji se može ojačati umetanjem jake željezne šipke.</li> <li>5. Ako je zgrada monolit, (...) onda je tim otpornija, čim su joj stijene tanje. Kod proračunavanja debljine osnovnih zidova, pregradni se mogu zanemariti.</li> <li>6. Radi smanjenja lateralnih deformacija valja graditi krute stropove i krovove čvrsto povezane s nosivim zidovima.</li> <li>7. Vatrobriani zid mora biti jednak čvrst kao i svi ostali zidovi i jednak čvrsto vezan sa stropovima i krovom.</li> <li>8. Čim bude u unutrašnjosti zgrade više čvrstih poprečnih zidova, tim će zgrada biti čvršća!</li> <li>9. Sve svodove valja zamijeniti gredama jer svodovi rastežu, a grede vežu zidove.</li> <li>10. Smanjiti na minimum sve dijelove zgrade koji ne doprinose čvrstoći (što lakša stubišta i pregradne stijene, izbjegavati teške ukrase).</li> <li>11. Prigradnje i krila zgrade neka se ili veoma čvrsto vežu s glavnom zgradom, ili neka se grade posebne neovisne zgrade.</li> <li>12. Svakovrsne izbočine na zgradici, ako ih već mora biti, neka budu vezane s poprečnim zidovima, te po mogućnosti lake i čvrste.</li> <li>13. Krov neka je lagan, čvrsti i čvrsto vezan sa svim zidovima. Ravni se krovovi preporučaju za seizmički jako aktivna područja.</li> <li>14. Dimnjaci neka su čim lakši i čim čvršći, čvrsto vezani s krovom.</li> <li>15. Da kod potresa na pada crijeplja sa zgrade na ulicu, neka se na rub krova metne rešetka od željeza.</li> </ol> | <p style="text-align: center;">Valja paziti na:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Jednostavnost strukture.</li> <li>b) Jednolikost i simetriju.</li> <li>c) Dvosmjernu otpornost i krutost.</li> <li>d) Torzijsku otpornost i krutost.</li> <li>e) Ponašanje stropova kao dijafragmi.</li> <li>f) Odgovarajuće temeljenje.</li> </ul> <p style="text-align: center;"><i>Mohorovičić ne razmatra samo d)!</i></p> |

Slika 6. Usporedba preporuka A. Mohorovičić i Eurocod-8



Slika 7. Primjer FRCM sustava na obnovi zgrade u Zagrebu

## 4 Zaključak

Dva snažna potresa koja su se desila 2020. godine u Republici Hrvatskoj, prouzrokovala su jaka oštećenja starijih zgrada i podsjetila su sve strukture društva da se naša država nalazi na trusnom području s mogućim razornim potresima. Fokusirano na obnovu zgrada, takva spoznaja nas treba poticati na djelovanje u dva smjera:

1. organizacijsku pripremu obnove za sjedeće moguće potrese,
2. žurno konstrukcijsko ojačanje zgrada koje su pretrpjеле zadnje potrese kao i preventivno ojačanje za one koje su potencijalno ugrožene u budućim potresima.

Obnova zgrada nakon potresa, velik su i složen organizacijski, inženjerski i finansijski projekt. Uspješnost realizacije takvog projekta ovisi o ispunjenju nekoliko osnovnih preduvjeta: iskustvo u provedbi masovne obnove; primjena načela upravljanja projektima i poznavanje struke.

Ključno je znati da se projekti masovnih obnova znatno razlikuju od pojedinačnih građevinskih projekata u organizacijskom smislu. Iskustva diljem svijeta, a posebno domaća iskustva dovoljno su velika kako se nepotrebne pogreške ne bi ponavljale. Vlastita iskustva potrebno je diseminirati, a tuđa akumulirati, kako bi poslije svake obnove fundus znanja o toj temi bio sve bogatiji.

## Literatura

- [1] UNISDR (United Nations International Strategy for Disaster Reduction), Terminology on disaster risk reduction, 2009. [http://www.preventionweb.net/files/7817\\_UNISDRTerminologyEnglish.pdf](http://www.preventionweb.net/files/7817_UNISDRTerminologyEnglish.pdf)
- [2] Procjena rizika od katastrofa za Republiku Hrvatsku – VRH, 2019. [https://civilna-zastita.gov.hr/UserDocsImages/DOKUMENTI\\_PREBACIVANJE/PLANSKI%20DOKUMENTI%201%20UREDDBE/Procjena%20rizika%20od%20katastrofa%20za%20RH.pdf](https://civilna-zastita.gov.hr/UserDocsImages/DOKUMENTI_PREBACIVANJE/PLANSKI%20DOKUMENTI%201%20UREDDBE/Procjena%20rizika%20od%20katastrofa%20za%20RH.pdf)
- [3] Nacrt dokumenta Procjena rizika od velikih nesreća za područje Grada Zagreba, 2019. [https://www.zagreb.hr/userdocsimages/hitne\\_situacije/sav/Procjena%20rizika%20od%20velikih%20nesreca%20za%20podrucje%20Grada%20Zagreba.pdf](https://www.zagreb.hr/userdocsimages/hitne_situacije/sav/Procjena%20rizika%20od%20velikih%20nesreca%20za%20podrucje%20Grada%20Zagreba.pdf)
- [4] Sterling, M.: Project management methodology for post disaster reconstruction, PMI® Global Congress 2008—Asia Pacific, Sydney, New South Wales, Australia, Newtown Square, PA: Project Management Institute. <https://www.pmi.org/learning/library/project-management-methodology-post-disaster-reconstruction-1857>
- [5] Johnson, L. A., Olshansky, R. B.: After great disasters, Lincoln Institute of Land Policy, 2016. <https://www.lincolninst.edu/publications/books/after-great-disasters>
- [6] Burkhard R. G.: Disasters - Rapid Response, Rapid Repairs, ProjektMagazin, 2014., [https://www.projektmagazin.de/artikel/disasters-rapid-response-rapid-repairs\\_1092299](https://www.projektmagazin.de/artikel/disasters-rapid-response-rapid-repairs_1092299)
- [7] Herceg Lj. i dr: Obnova obiteljskih kuća u Hrvatskoj od 1995. do 1999., Sabor hrvatskih graditelja 2000. pp. 51-57, 2000.
- [8] Uhlir, Ž.: Obnova oštećenih kuća na poplavljениm područjima u Slavoniji, OTMC2015 Conference, pp. 10-17, 2015.

- [9] BRR: 10 Management Lessons for Host Governments Coordinating Post-disaster Reconstruction, Executing Agency for Rehabilitation and Reconstruction, Indonesia, 2009. <https://www.preventionweb.net/publication/10-management-lessons-host-governments-coordinating-post-disaster-reconstruction>
- [10] Uhlir, Ž.: Strategic approach to the project of reconstruction after the earthquake in Zagreb and legal frame, 1CroCEE, pp. 809-811, 2021.
- [11] Hochwasser - Diese Unternehmen sind von der Flut betroffen, 2021., <https://www.capital.de/wirtschaft-politik/diese-unternehmen-sind-von-der-flut-betroffen>
- [12] Enshassi, A. i dr.: Factors Influencing Post-disaster Reconstruction Project Management for Housing Provision in the Gaza Strip, Occupied Palestinian Territories, 2017., <https://link.springer.com/article/10.1007/s13753-017-0155-4>
- [13] Christchurch earthquake anniversary - how the rebuild failed, 2021., <https://slate.com/business/2021/02/christchurch-earthquake-anniversary-how-the-rebuild-failed.html>
- [14] Dzulkarnaen, I. i dr.: Project Management For Post Disaster Reconstruction Project: A Literature Review, 2014., [https://www.researchgate.net/publication/265851717\\_Project\\_Management\\_For\\_Post\\_Disaster\\_Reconstruction\\_Project\\_A\\_Literature\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/265851717_Project_Management_For_Post_Disaster_Reconstruction_Project_A_Literature_Review)
- [15] UNDRO (United Nations Disaster Relief Coordinator), Shelter After Disaster, 1982., <https://digitallibrary.un.org/record/48456>
- [16] IPMA/HUUP, Temeljne individualne kompetencije za upravljanje projektima, Zagreb, 2018.
- [17] The World Bank/GFDRR (Global Facility for Disaster Reduction and Recovery), Earthquake Reconstruction, 2011., [https://www.gfdrr.org/sites/default/files/publication/GFDRR\\_Earthquake\\_Reconstruction16Nov2011\\_0.pdf](https://www.gfdrr.org/sites/default/files/publication/GFDRR_Earthquake_Reconstruction16Nov2011_0.pdf)
- [18] Uroš, M. i dr.: Potresno inženjerstvo – obnova zidanih zgrada, Građevinski fakultet u Zagrebu, Zagreb, 2021.
- [19] VTT: Constructive and performance analysis of the retrofit systems for vertical masonry elements, 2011., [https://www.academia.edu/es/67935209/Steel\\_solutions\\_for\\_the\\_seismic\\_retrofit\\_and\\_upgrade\\_of\\_existing\\_constructions\\_Constructive\\_and\\_performance\\_analysis\\_of\\_the\\_retrofit\\_systems\\_for\\_vertical\\_masonry\\_elements](https://www.academia.edu/es/67935209/Steel_solutions_for_the_seismic_retrofit_and_upgrade_of_existing_constructions_Constructive_and_performance_analysis_of_the_retrofit_systems_for_vertical_masonry_elements)
- [20] Španić, M. i dr.: Ojačanje povijesnih građevina kompozitnim polimerima, E-GFOS, 3, pp. 74 – 85, 2012., <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:133:882996>
- [21] Potresno građevinarstvo, zbornik radova, DGIT-Zagreb i Društvo za potresno građevinarstvo Hrvatske, Zagreb, 1988.
- [22] Mohorovičić, A., Djelovanje potresa na zgrade, Vjesti Hrvatskog društva inžinira i arhitekta, Zagreb, 1911.
- [23] Herak M., Mohorovićev seismološki opus, Kroz koru do plašta - nove spoznaje o Andriji Mohorovičiću, Zagreb, HAZU, pp. 77-90, 2019.



## Izrada projektno-tehničke dokumentacije za cjelovitu obnovu zgrada nakon potresa

Autor:

**Mr.sc. Dragan Kovač<sup>1</sup>, Mario Todorić<sup>2</sup>, Ivan Crnković<sup>2</sup>,**  
**Matea Sruk<sup>2</sup>**

Capital Ing d.o.o., Zagreb  
Toding d.o.o., Zagreb

# Izrada projektno-tehničke dokumentacije za cjelovitu obnovu zgrada nakon potresa

Dragan Kovač, Mario Todorić, Ivan Crnković, Matea Sruk

## Sažetak

Nakon potresa koji su pogodili Republiku Hrvatsku tijekom 2020. godine u svrhu što kvalitetnije i efikasnije obnove bilo je potrebno razviti zakonski okvir i definirati primjene tehničke metode za obnovu zgrada oštećenih potresom. Ovim radom prikazuje se postupak izrade projekta cjelovite obnove zgrada prema aktualnim propisima. Cjelovita obnova obuhvaća obnovu konstrukcije i njeno ojačanje prema traženoj razini obnove kao i zadovoljavanje temeljnog zahtjeva vezanog uz gospodarenje energijom i očuvanje topline. Mnoge oštećene zgrade se nalaze u području pod konzervatorskom zaštitom ili su pojedinačna kulturna dobra što predstavlja dodatan izazov prilikom cjelovite obnove.

**Ključne riječi:** potres, cjelovita obnova, razine obnove, proračun konstrukcije, energetska obnova

## Design and technical documentation for complete renovation of buildings after an earthquake

### Abstract

After the earthquakes that hit Croatia in 2020, it was necessary to develop a legal framework and define appropriate technical methods for the reconstruction of earthquake-damaged buildings with quality and efficiency in mind. This work presents the process of design for complete renovation of buildings according to current regulations. The complete renovation includes structural retrofitting according to the required level of retrofit, as well as meeting the basic requirements related to energy management and heat preservation. Many damaged buildings are located in an area under conservation protection or are individual cultural assets, which represents an additional challenge during complete restoration.

**Key words:** earthquake, complete renovation, level of retrofit, structural design, energy retrofit

## 1 Uvod

Obnova zgrada nakon potresa izuzetno je složen i zahtjevan proces. Mnogo je javnih i stambenih objekata izvan funkcije što predstavlja veliki humanitarni, društveni i ekonomski problem. Kvalitetna i brza obnova je od najvišeg prioriteta Republike Hrvatske. Od raznih pristupa obnovi najkompleksniji je pristup cijelovite obnove zgrada. Osim projektanta konstrukcije u takvoj obnovi sudjeluju i druge struke (arhitekti, strojari, elektro projektanti) kako bi se zadovoljili svi potrebni temeljni zahtjevi za građevine prema Zakonu o obnovi. Kod zgrada oštećenih u potresu ključno je osigurati mehaničku otpornost i stabilnost konstrukcije zgrade. Projektant konstrukcije tako treba procijeniti postojeću potresnu otpornost zgrade i dati optimalna rješenja za njezinu obnovu u skladu s razinama obnove koje su propisane Tehničkim propisom za građevinske konstrukcije i drugim propisima vezanim za građevinske konstrukcije. U propisima vezanim za obnovu propisani su svi potrebni elementi projektne dokumentacije obnove zgrada oštećenih potresom, projekta za uklanjanje zgrade i projekta za građenje obiteljske stambene kuće te uvjeti njihove provedbe obnovom i uklanjanjem oštećenih zgrada te građenjem zamjenskih obiteljskih kuća. U ovom članku napravljen je pregled zakonskog okvira i postupka izrade projektne dokumentacije za cijelovitu obnovu zgrada oštećenih u potresu. Prikazan je pregled trenutnih propisa vezanih uz obnovu, proračunskih metoda za obnovu i ojačanje konstrukcija zgrada te ostalih temeljnih zahtjeva koje je potrebno zadovoljiti u cijelovitoj obnovi zgrada oštećenih u potresu.

## 2 Zakonodavni okvir za cijelovitu obnovu zgrada oštećenih potresom

Nakon potresa 22. ožujka 2020. koji je pogodio područje Grada Zagreba, Krapinsko-zagorske i Zagrebačke županije te potresa 29. prosinca 2020. koji je pogodio područje Petrinje i Sisačko-moslavačke županije u svrhu što brže obnove oštećenih zgrada donesen je niz novih propisa i njihovih izmjena koji reguliraju postupak obnove zgrada oštećenih u potresu. Propisi kojima je prije potresa bilo uređeno područje prostornog uređenja i gradnje nisu bili primjerici za brzu i efikasnu obnovu tolikog broja građevina koje su oštećene u potresu. Također s inženjerske strane postojalo je mnogo nedoumica o cijelom postupku, od urgentnih mjera koje je bilo potrebno poduzeti neposredno nakon potresa do pitanja razine otpornosti koje je potrebno postići obnovom. Složenosti postupku obnove oštećenih građevina doprinosi i činjenica da je velik broj oštećenih objekta pod nekim oblikom konzervatorske zaštite. Zbog svega toga bilo je potrebno donijeti nove propise koji će urediti područje obnove zgrada oštećenih u potresu, a iste će biti potrebno s vremenom dodatno unaprijediti na temelju iskustvenih znanja koja stječemo svakodnevno na građevinama koje obnavljamo.

## 2.1 Aktualni propisi

Propisi koji predstavljaju zakonodavni okvir obnove nakon potresa:

- Zakon o obnovi zgrada oštećenih potresom na području Grada Zagreba, Krapinsko-zagorske županije, Zagrebačke županije, Sisačko-moslavačke županije i Karlovačke županije (NN 102/20, 10/21 i 117/21)
- Zakon o gradnji (NN 153/13, 20/17, 39/19, 125/19)
- Pravilnik o sadržaju i tehničkim elementima projektne dokumentacije obnove, projekta za uklanjanje zgrade i projekta za građenje zamjenske obiteljske kuće oštećenih potresom na području Grada Zagreba, Krapinsko-zagorske županije i Zagrebačke županije (127/20)
- Tehnički propis za građevinske konstrukcije (NN 17/17, 75/20 i 7/22)
- Program mjera obnove zgrada oštećenih potresom na području Grada Zagreba, Krapinsko-zagorske županije, Zagrebačke županije, Sisačko-moslavačke županije i Karlovačke županije (NN 88/22)

## 2.2 Razlike i sličnosti postupka obnove i gradnje

Nadležno tijelo za postupak obnove je Ministarstvo prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine kao i kod postupka gradnje. Cijeli postupak obnove građevina na temelju Zakona o obnovi zgrada oštećenih potresom uima nešto drugačiju proceduru spram postupka gradnje.

Za svaki postupak obnove potrebno je kao i kod gradnje ishoditi posebne uvjete putem e-dozvole, međutim kod postupak obnove jedini posebni uvjeti su konzervatorski uvjeti.

Za razliku od gradnje, gdje je za početak korištenja građevine potrebno ishoditi uporabnu dozvolu koja se dobiva na temelju obavljenog tehničkog pregleda, kod postupka obnove nema tehničkog pregleda. Obnovljena zgrada za koju je izrađeno završno izvješće i doneseno rješenje o obnovi smatra se u smislu propisa o gradnji postojećom građevinom za koju je izdana pravomoćna uporabna dozvola. [1]

Važno je naglasiti kako zahvatom obnove nije dozvoljeno mijenjati lokacijske uvjete, odnosno nije dozvoljeno izvoditi dogradnju, nadogradnju, promjenu namjene, promjenu GBP-a. Za sve takve izmjene potrebno je ići na postupak izdavanja građevinske dozvole.

## 2.3 Ocjena uporabljivosti kao osnovni element obnove

Nakon prvog potresa 22. ožujka 2020. u organizaciji nadležnog stožera po hitnom postupku su organizirani pregledi zgrada na terenu. Iskorišten je obrazac za pregled građevina u hitnoj situaciji nakon potresa koji je s vremenom unaprijeđen, a kreirana je i mobilna aplikacija koja je olakšala prikupljanje podataka. Kao zaključak pregleda građevinama su bile dodijeljene ocjene uporabljivosti koje su postale jedan od osnovnih elemenata obnove s pravnim učinkom. Naljepnice su prikazane na slici 1.

Navedene su moguće ocijene uporabljivosti [2]:

- N1: neuporabljiva zbog vanjskih utjecaja
- N2: neuporabljiva zbog oštećenja
- PN1: privremeno neuporabljiva građevina – potreban detaljan pregled

- PN2: privremeno neuporabljiva građevina – potrebne mjere hitne intervencije
- U1: uporabljiva građevina uz manja oštećenja
- U2: uporabljiva građevina s preporukom
- U0: uporabljiva građevina bez oštećenja.



Slika 1. Izgled naljepnica za ocjenu uporabljivosti [3]

Zgrade koje su ocijenjene kao uporabljive nisu predmet obnove. Na njima je moguće raditi zahvate sukladno Zakonu o gradnji. Na zgrada sa ocjenom privremeno neuporabljive i neuporabljive moguće je na temelju Zakona o obnovi zgrada oštećenih u potresu izvršiti obnovu.

## 2.4 Razine obnove u odnosu na mehaničku otpornost i stabilnost

Prema Tehničkom propisu za građevinske konstrukcije (NN 17/17) i Tehničkom propisu o izmjeni i dopuni tehničkog propisa za građevinske konstrukcije [NN 75/2020, NN 7/2022] predviđa se popravak konstrukcije uz pojačanja kojima se postiže mehanička otpornost i stabilnost zgrade na potresno djelovanje za stanje značajnog oštećenja.

Stanje oštećenja konstrukcije je u HRN EN 1998-3 definirano s tri granična stanja (GS):

- GS blizu rušenja (BR)
- GS znatnog oštećenja (ZO)
- GS ograničenog oštećenja (OO)

Prema hrvatskom nacionalnom dodatku HRN EN 1998-3 pri ocjenjivanju i obnovi zgrada kontrolira se granično stanje znatnog oštećenja (ZO) i granično stanje ograničenog oštećenja (OO).

Zgrade koje su ocijenjene kao uporabljive nisu predmet obnove. Na njima je moguće raditi zahvate sukladno Zakonu o gradnji. Na zgradama sa ocjenom privremeno neuporabljive i neuporabljive moguće Razine obnove su definirane parametrom koji se zove indeks znatnog oštećenja (IZO). Indeks znatnog oštećenja konstrukcije (IZO) je omjer proračunske potresne otpornosti i zahtjeva se za konstrukciju za granično stanje znatnog štećenja. Proračunska potresna otpornost je vrijednost potresnog djelovanja iskanog kao vršno ubrzanje tla tipa A za koje konstrukcija doseže granično stanje znatnog oštećenja. Zahtjev za konstrukciju za granično stanje znatnog oštećenja je poredbeno potresno djelovanje koje se iskazuje kao poredbeno vršno ubrzanje tla tipa A za poredbeno povratno razdoblje 475 godina (vjerojatnost premašaja 10% u 50 godina). To znači da je razina obnove definirana preko otpornosti konstrukcije.

**Tablica 1. Razine obnove – skraćeni izvod iz Tehničkog propisa [4]**

| Razine obnove   | Zahtjev  | Otpornost   |
|---|--|---|
| <b>Razina 1: popravak nekonstrukcijskih elemenata</b> | Nekonstrukcijske elemente dovesti do razine lokalne nosivosti i stabilnosti, popravkom ili zamjenom oštećenog nekonstrukcijskog elementa. Ponovno izvedeni oštećeni nekonstrukcijski elementi trebaju imati lokalnu nosivost i stabilnost u odnosu na potresna djelovanja. Potresna otpornost zgrade u cijelini se ne razmatra.                  | -   |
| <b>Razina 2: popravak konstrukcije</b>                | Popravak gradevinske konstrukcije radi postizanja proračunske potresne otpornosti koju je konstrukcija imala prije potresa ili veće uz lokalna pojačanja kritičnih nosivih elemenata i iznimno dodavanje novih nosivih vertikalnih elemenata kad se radi o konstrukciji s bitno različitom potresnom otpornosti jednog smjera u odnosu na drugi. | Razinom obnove treba postići indeks znatnog oštećenja konstrukcije (IZO) najmanje 0,5.  |
| <b>Razina 3: pojačanje konstrukcije</b>               | Poboljšanje sa ciljem dovođenja gradevinske konstrukcije u stanje poboljšane proračunske potresne otpornosti.  | Razinom obnove treba postići indeks znatnog oštećenja konstrukcije (IZO) najmanje 1,0. U ovoj razini obnove obvezna je osim provjere graničnog stanja znatnog oštećenja i provjera graničnog stanja ograničenog oštećenja prema HRN EN 1998-3 za potresno djelovanje određeno za potres s poredbenom vjerojatnosti premašaja od 10% u 10 godina (poredbeno povratno razdoblje 95 godina) i faktor važnosti za zgrade prema HRN EN 1998-1. |
| <b>Razina 4: cjelovita obnova konstrukcije</b>        | Poboljšanje sa ciljem dovođenja gradevinske konstrukcije u stanje potpune proračunske potresne otpornosti u odnosu na propise.   | Razinom obnove treba postići indeks znatnog oštećenja konstrukcije (IZO) najmanje 1,0. U ovoj razini obnove obvezna je osim provjere graničnog stanja znatnog oštećenja i provjera graničnog stanja ograničenog oštećenja prema HRN EN 1998-3 za potresno djelovanje određeno za potres s poredbenom vjerojatnosti premašaja od 10% u 10 godina (poredbeno povratno razdoblje 95 godina) i faktor važnosti za zgrade prema HRN EN 1998-1. |

Razine obnove detaljnije su objašnjene u Tehničkom propisu za građevinske konstrukcije (NN 17/17, 75/20 i 7/22) gdje su za svaku razinu prikazani zahtjevi, potrebna dokumentacija, opis zahvata i radova te kategorija zgrada na koju se razina odnosi. U posebnim slučajevima moguće je u posebnim slučajevima. Odstupanje od temeljnog zahtjeva za građevinu propisanog razinama obnove moguće je u slučaju ispunjavanja uvjeta za primjenu članka 16. stavka 1. Zakona o gradnji (»Narodne novine«, broj 153/13, 20/17, 39/19 i 125/19), samo za pojedinačno zaštićena kulturna dobra nacionalne važnosti i ukoliko je predviđeni način obnove konstrukcije zgrade prethodno jednoglasno odobrilo stručno povjerenstvo u sastavu: dva revidenta za mehaničku otpornost i stabilnost, dva predstavnika akademске zajednice iz područja potresno inženjerstvo, grana građevinarstvo i glavni državni konzervator, koje imenuje ministar prostornoga uređenja, graditeljstva i državne imovine, u skladu s poslovnikom kojeg donosi ministar [4].

### 3 Projektna dokumentacija za cjelovitu obnovu

U okviru Zakona o obnovi zgrada oštećenih potresom definirano je nekoliko vrsta projekata kojima se daju tehnička rješenja u sklopu obnove:

- projekt obnove konstrukcije zgrade
- projekt cjelovite obnove
- projekt uklanjanja zgrade
- projekt za građenje zamjenske obiteljske kuće.

Definicija svake od navedenih vrsta projekta dana je u sklopu Zakona o obnovi zgrada oštećenih potresom, a u ovom radu ćemo se baviti projektom dokumentacijom za cjelovitu obnovu. Proces projektiranja obnove odvija se u dvije faze. U prvoj fazi izrađuje se Elaborat ocjene postojećeg stanja građevinske konstrukcije, a u drugoj fazi se izrađuje Projekt obnove. Važno je istaknuti da svaki projekt obnove podliježe obaveznoj kontroli projekta po pitanju mehaničke otpornosti i stabilnosti.

#### 3.1 Elaborat ocjene postojećeg stanja građevinske konstrukcije

Elaborat ocjene postojećeg stanja građevinske konstrukcije je prva faza u projektiranju obnove zgrade. Tu se provodi detaljan pregled postojećeg stanja zgrade koji obuhvaća snimku postojećeg stanja, snimku oštećenja, analizu postojeće konstrukcije te planiranje daljnjih istraživanja i zahvata na konstrukciji.

Elaboratom ocjene postojećeg stanja građevinske konstrukcije utvrđuje se zatečeno stvarno stanje građevinske konstrukcije postojeće zgrade, na način da se ocjenjuje je li oštećena zgrada uopće pogodna za obnovu te je li obnova građevinske konstrukcije dovoljna ili su nužni i zahvati na unaprjeđenju i drugih temeljnih zahtjeva za građevinu, i to očevodom na zgradu kojim se provodi detaljni pregled zgrade, vizualnim pregledom, uvidom u dokumentaciju zgrade, po potrebi provedbom istražnih radova te se procjenjuju troškovi za obnovu zgrade za ocijenjenu razinu i potencijalne više razine obnove zgrade odnosno način obnove zgrade [5].

Tehnički dio elaborata ocjene postojećeg stanja građevinske konstrukcije sadržava [5]:

- opis tehničkog stanja postojeće zgrade koja se obnavlja (sve snimke postojećeg stanja zgrade obavezno uključujući snimke oštećenja)
- podatke o aktu na temelju kojeg je izgrađena odnosno kojim je stekla status postojeće zgrade
- provjeru i analizu ispunjavanja temeljnog zahtjeva mehaničke otpornosti i stabilnosti
- analizu potresne otpornosti postojeće konstrukcije
- elaboriranu ocjenu postojećeg stanja građevinske konstrukcije kojom se ocjenjuje je li oštećena zgrada uopće pogodna za obnovu i je li obnova građevinske konstrukcije dovoljna ili su nužni i zahvati na unaprjeđenju drugih temeljnih zahtjeva za građevinu, sve prema provedenom detalnjom pregledu koji mora obuhvatiti cijelokupnu zonu zahvata koja se obnavlja (obavezno obuhvaća vizualni pregled, uvid u postojeću dokumentaciju i po potrebi provedbu istražnih radova kojima se utvrđuje vrsta i stanje konstrukcije, geometrija, mehanička svojstva i stanje svih konstruktivnih elemenata zgrade, stanje svih drugih elemenata zgrade kao što je npr. stanje instalacija i opreme i sl.)
- program potrebnih istražnih radova i ispitivanja konstrukcije uključujući rezultate i nalaže istražnih radova sa shematskim prikazom oštećenja
- potrebnu razinu obnove konstrukcije i/ili ocjenu da je zgrada izgubila svoju mehaničku otpornost i/ili stabilnost u toj mjeri da je urušena ili da njezina obnova nije moguća
- opis očekivanih zahvata na konstrukciji/zgradi s tehničkim rješenjima za obnovu konstrukcije zgrade i smjernicama za izradu projekta obnove konstrukcije zgrade odnosno projekta obnove zgrade za cijelovitu obnovu zgrade
- procjenu troškova.

Sadržaj elaborata ocjene postojećeg stanja građevinske konstrukcije definiran je u Pravilnik o sadržaju i tehničkim elementima projektne dokumentacije obnove (NN 127/20).

### **3.2 Projekt cijelovite obnove**

Cijelovita obnova zgrade podrazumijeva cijelovitu obnovu građevinske konstrukcije te izvođenje potrebnih pripremnih, građevinskih, završno-obrtničkih i instalaterskih radova odnosno radova kojima se zgrada dovodi u stanje potpune građevinske uporabljivosti do razine koju zahtijevaju pravila struke, a uz ostale potrebne radove, po potrebi, obuhvaća i popravak nekonstrukcijskih elemenata, popravak konstrukcije, pojačanje konstrukcije zgrade i/ili cijelovitu obnovu konstrukcije. Osim temeljnog zahtjeva za građevine koji se odnosi na mehaničku otpornost i stabilnost te gospodarenje energijom i očuvanje topline, drugi temeljni zahtjevi se u cijelovitoj obnovi zgrade ispunjavaju ako je to moguće bez znatnijih zahvata na zgradi i bez znatnijeg povećanja troškova. [1]

Tehnički dio projekta obnove konstrukcije zgrade sadrži tekstualni dio i grafičke prikaze. Tekstualni dio projekta obnove konstrukcije zgrade sadrži sve tehničke, tehnološke i druge podatke, proračune i rješenja kojima se dokazuje da će obnovljena zgrada ispunjavati temeljni zahtjev mehaničke otpornosti i stabilnosti prema Tehničkom propisu [5].

U tekstualnom dijelu građevinskog projekta cijelovite obnove sadržani su svi podaci o zgradi odnosno njezinom dijelu, te proračun i rješenja, i to sljedeće: [5]

- podaci o aktu na temelju kojeg je izgrađena odnosno kojim je stekla status postojeće zgrade
- podaci iz elaborata ocjene postojećeg stanja građevinske konstrukcije o utvrđenom zatečenom stvarnom stanju postojeće zgrade
- tehnički opis zgrade uz obavezno iskazivanje ukupne ploštine podova zgrade izračunate prema točki 5.1.3. HRN ISO 9836
- mogućnost i uvjete uporabe dijelova obnovljene zgrade prije dovršetka obnove konstrukcije zgrade ovisno o razini obnove
- dokazi da će postojeći materijali i građevni proizvodi koji su ugrađeni u dijelove zgrade nakon obnove zadovoljiti propisane zahtjeve i uvjete, te da je zgrada odnosno njezin dio prikladan za obnovu kao cjelina
- dokaz zatečene potresne otpornosti zgrade u odnosu na potresnu otpornost zgrade prema normama niza HRN EN 1998 i pripadnim nacionalnim dodacima na koje upućuje Tehnički propis
- dokazi o ispunjavanju temeljnog zahtjeva mehaničke otpornosti i stabilnosti, proračunima mehaničke otpornosti i stabilnosti te drugim proračunima i odgovarajućim metodama kojima se dokazuje da je obnova zgrade projektirana tako da ispunjava navedeni temeljni zahtjev
- program kontrole i osiguranja kvalitete s uvjetima ispunjavanja temeljnog zahtjeva mehaničke otpornosti i stabilnosti tijekom obnavljanja i održavanja zgrade (procedure osiguranja kvalitete, program ispitivanja i dr.)
- posebnim tehničkim uvjetima obnove, posebnim tehničkim uvjetima za gospodarenje građevnim otpadom koji nastaje tijekom obnove i pri uklanjanju zgrade ili njezinog dijela, i posebnim tehničkim uvjetima za gospodarenje opasnim otpadom, ako se tijekom obnove, korištenja odnosno pri uklanjanju zgrade pojavljuje opasni otpad
- ocjena potresne otpornosti zgrade kojom se iskazuje omjer proračunske potresne otpornosti zgrade i potresne otpornosti prema normama niza HRN EN 1998 i pripadnim nacionalnim dodacima na koje upućuje Tehnički propis
- troškovnička specifikacija s detaljnim opisom svih neophodnih radova za obnovu konstrukcije zgrade
- iskaz procijenjenih troškova obnove.

Prema obveznom sadržaju definiranom Pravilniku [5] vidimo da projekt obnove konstrukcije sadržava dva proračuna otpornosti konstrukcije, jedan zatečeno stanje, a drugi za stanje nakon popravka i/ili pojačanja na traženu razinu obnove.

## 4 Konstruktivska obnova

Izrada projekta obnove konstrukcije zgrade, čiji obavezni sadržaj je preciznije opisan u prethodnim poglavljima, ovisi o razini složenosti građevine, te o odnosu zatečene otpornosti i ciljane otpornosti koja je zakonima predviđena. Prema podacima detaljnoga inženjerskog pregleda zgrade i provedenoga proračuna s rezultatima istražnih radova, a kojima se utvrdio približni stupanj potresne otpornosti postojeće zgrade donosi se ocjena je li zgrada "izgubila" svoju mehaničku otpornost i stabilnost u tolikoj mjeri da je

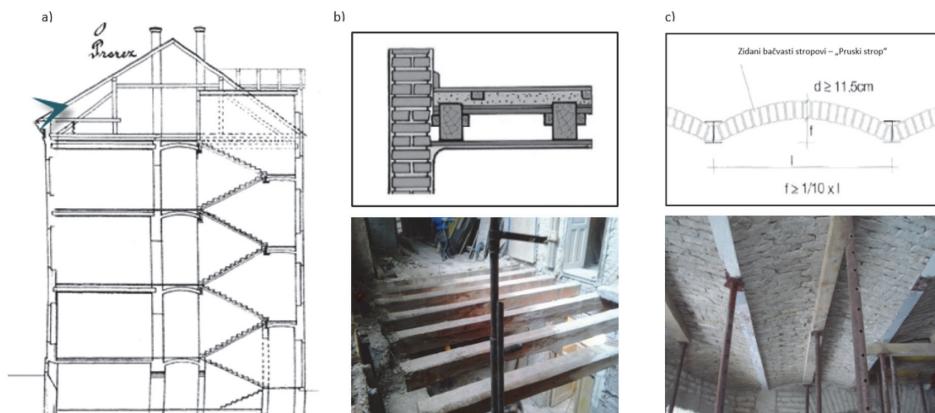
urušena, odnosno da je u stanju pred urušavanjem i da njezina obnova nije moguća. U slučaju da provedene analize pokažu da je obnova zgrade opravdana, potrebno je dati odgovarajuća obrazloženja s prijedlogom potrebne razine obnove [6].

#### 4.1 Tipologija zgrada oštećenih potresom

Konstrukcije svih potresom znatnije oštećenih zgrada visokogradnje (višestambene zgrade, stambeno-poslovne zgrade, poslovne zgrade, obiteljske kuće, zgrade javne namjene), imaju bitne nedostatke s obzirom na potresnu otpornost. Te konstrukcije najčešće imaju potrebnu strukturu i nosivost s obzirom na osnovna djelovanja: stalno, uporabno, vjetar i ostala djelovanja, no ne i za potres [6].

Konstrukcije svih zgrada u pogledu njihove strukture, a posebno istaknuto u pogledu protupotresne otpornosti, imaju bitna karakteristična svojstva za neko određeno razdoblje gradnje. Zgrade koje su u Hrvatskoj izgrađene do 1948. godine izvedene su u vrijeme kada nisu postojali tehnički propisi za projektiranje i izvedbu zgrada otpornih na djelovanje potresa. Zgrade možemo podijeliti prema razdoblju gradnje na sljedeće: razdoblje 19.stoljeća, razdoblje 1900.-1948. , razdoblje 1948.-1964. i razdoblje od 1964. do danas.

Izvorni nedostaci građevina iz razdoblja prije prvih tehničkih propisa su nepovezani konstruktivni elementi. Konstrukcije su klasične za taj period gradnje, zidane konstrukcije od pune opeke s fleksibilnim drvenim stropovima (slika 2.) i nepridržanim zabatnim zidovima (slika 3.).

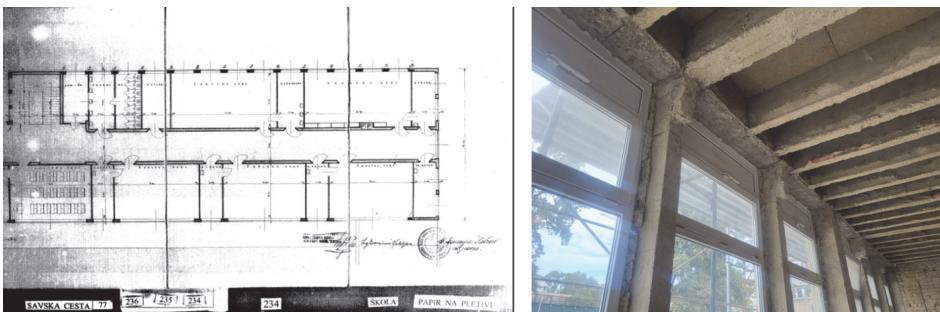


Slika 2. a) Karakterističan presjek donjogradske zgrade [7]; b) detalj izvedbe međukatne konstrukcije drvenih grednika i fotodokumentacija zatečenog sustava prilikom izvedbe sanacije [7]; c) detalj izvedbe opečnih bačvastih svodova i fotodokumentacija zatečenog sustava prilikom pregleda građevina [7]



Slika 3. Karakteristični detalji izvedbe drvenih krovista i detalj oslanjanja krovista na zidove od opeke [6]

Nakon 1930. godine, s pojavim prvih propisa, konstruktivni sustavi se značajno razlikuju. Uvedene su stropne AB konstrukcije, sitnorebričasti stropovi, pojavljuju se AB grede na spojevima stropova i zidova, zidovi su omeđeni vertikalnim serklažima i temelji se izvode na AB temeljnim trakama. (slika 4.).



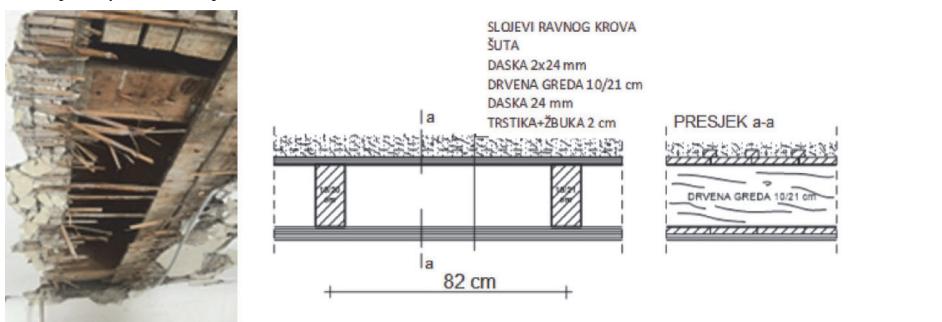
Slika 4. a) Tlocrtna dispozicija karakterističnog kata Učiteljskog fakulteta iz razdoblja gradnje oko 1930. godine [7]; b) sitnorebričasta međukatna konstrukcija Agronomskog fakulteta pronađena prilikom provedbe radova obnove [8]

Konstrukcije zgrada trebaju imati primjereno složenu prostornu protupotresnu strukturu koja može preuzeti djelovanja potresa iz bilo kojega smjera uz pojavu dopuštene razine deformacija, pomaka i oštećenja. Međutim, velika većina oštećenih zidanih zgrada ima konceptualne nedostatke izvorne konstrukcije u pogledu njihove protupotresne otpornosti [6]. Seizmička ranjivost zidanih zgrada osim u navedenim izvornim nedostacima vidljiva je i u raznim konstruktivnim preinakama rađenim tijekom godina te dosadašnjim oštećenjima.

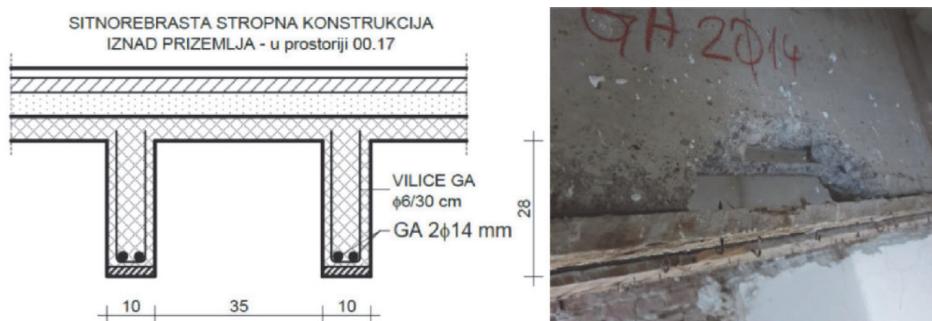
Upravo iz tog razloga neophodno je prije razrade projekta obnove utvrditi konstruktivni sustav i materijalne karakteristike sustava kako bi se što realnije prikazalo postojeće stanje i odredio faktor povjerenja pri dokazu mehaničke otpornosti i stabilnosti.

## 4.2 Prethodne aktivnosti i istražni radovi

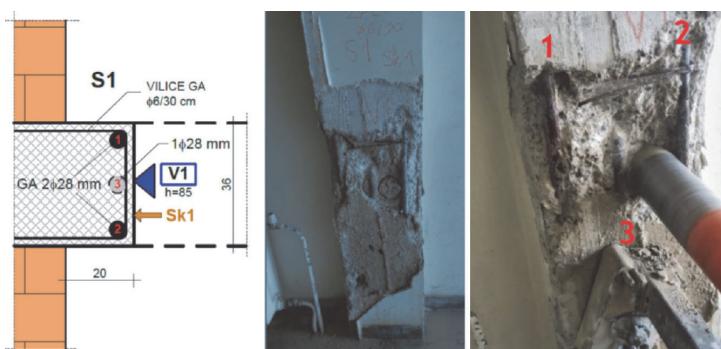
Kako bi se izradio dokaz mehaničke otpornosti i stabilnosti i utvrdio stupanj potresne otpornosti postojeće zgrade, treba ustanoviti postojeći konstrukcijski sustav, dimenzije i kvalitetu ugrađenih materijala. Prvi korak u utvrđivanju tipa konstrukcije je pregled arhivske projektne dokumentacije i snimka postojećeg stanja. Za izradu projekta sanacije i obnove oštećenih građevina preporuka je provesti prethodna istraživanja i ispitivanja kojima će se utvrditi mehanička svojstva materijala od kojih su izvedene, posebno kod tipologije građevina koje su seizmički ranjive. U nastavku na slikama 5. do 7. prikazani su detalji sa provođenja istražnih radova.



Slika 5. Istražni radovi: mjesto otvaranja stropa s pripadnim slojevima stropne konstrukcije [6]



Slika 6. Istražni radovi: Količina armature ugrađene u rebra sitnorebraste stropne konstrukcije [6]



Slika 7. Istražni radovi: Utvrđena količina armature u AB stup [6]

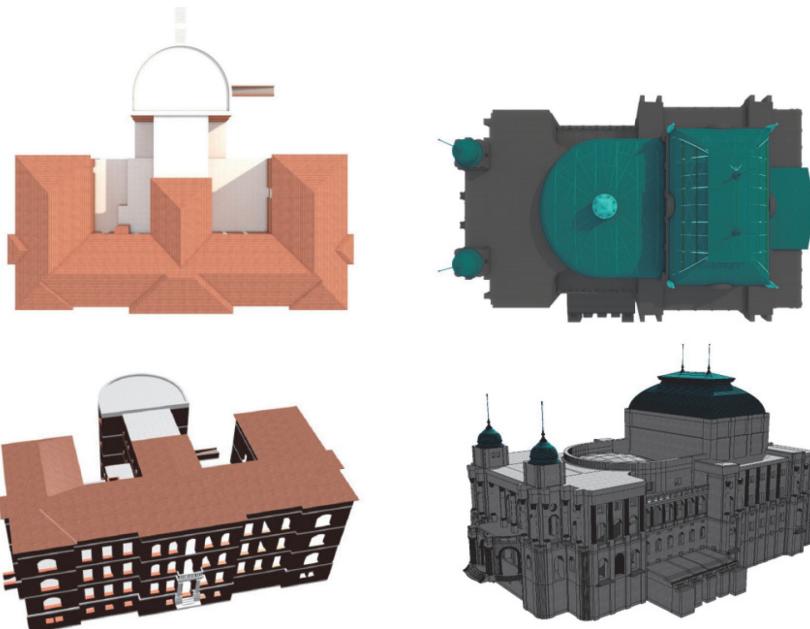
Popis mogućih istražnih radova na konstrukciji:

- temelji: utvrđivanje vrste, kvalitete, izmjere dimenzija, oštećenja temelja, određivanje dubine temeljenja
- istražne sonde u stropnim konstrukcijama radi određivanje ukupne debljine stropova, vrste stropne konstrukcije, debljine slojeva, dimenzija i razmaka nosivih elemenata;
- ispitivanje mehaničkih svojstava materijala (posmična čvrstoća zida, čvrstoća čeličnih elemenata), nosivosti tla i slijeganje
- u sklopu konzervatorskih istraživanja - provedba 3D skeniranja objekta - analiza deformacija konstrukcije – određivanje progiba.

Prije izrade arhitektonskog snimka postojećeg stanja kod složenijih građevina, posebno kulturno zaštićenih, poželjno je izvesti 3D skeniranje građevine (slika 8.). Iz podataka dobivenih skeniranjem izrađuje se prostorni model građevine (slika 9.) koji služi za izradu arhitektonskih podloga i što vjernijeg prikaza mjera ojačanja.



Slika 8. Snimak 3D skenerom – primjeri iz prakse [7], [8]



Slika 9. Prostorni model postojećeg stanja napravljen iz cloud modela – primjeri iz prakse [8]

#### 4.2.1 Faktor povjerenja

Na temelju dostupnih podataka o konstrukciji i razini znanja (RZ) određuje se faktor povjerenja (FP) s kojim se provodi proračun. Pri određivanju parametara postojećih materijala koji će se koristiti u proračunu, srednje vrijednosti dobivene ispitivanjima in situ te podataka iz dodatnih izvora, trebaju se podijeliti s faktorom povjerenja (FP) za odgovarajuću razinu znanja.

**Tablica 2. Razine znanja i odgovarajuće metode proračuna (MBS – metoda bočnih sila, MMSO – metoda modalnog spektra odziva) i faktori povjerenja (FP) [6]**

| Razina znanja | Geometrijski odnosi  | Detalji   | Materijali   | Proračun   | FP                |
|---------------|--|---|--|------------|-------------------|
| RZ1           | Iz izvornih nacrta uz uzorak vizualnog snimka ili prema cijelovitom snimku | Simulirani proračun u skladu s odgovarajućom praksom i prema ograničenom pregledu <i>in situ</i>                      | Uobičajene vrijednosti u skladu s normama iz vremena gradnje i iz ograničenih ispitivanja <i>in situ</i>                 | MBS-MMSO   | FP <sub>RZ1</sub> |
| RZ2           |  | Iz nepotpunih izvornih izvedbenih nacrta uz ograničeni pregled <i>in situ</i> ili iz opsežnog pregleda <i>in situ</i> | Iz izvornih projektnih specifikacija uz ograničeno ispitivanje <i>in situ</i> ili iz opsežnih ispitivanja <i>in situ</i> | Sve metode | FP <sub>RZ2</sub> |
| RZ3           |  | Iz izvornih izvedbenih nacrta uz ograničeni pregled <i>in situ</i> ili iz sveobuhvatnog pregleda <i>in situ</i>       | Iz izvornih ispitnih izvještaja uz ograničeno ispitivanje <i>in situ</i> ili iz sveobuhvatnih ispitivanja <i>in situ</i> | Sve metode | FP <sub>RZ3</sub> |

**Tablica 3. Preporučeni najmanji zahtjevi za razine pregleda i ispitivanja prema HRN EN 1998-3 [7]**

|                               | Pregled (detalja)                                   | Ispitivanje (materijala)  |
|-------------------------------|---|---------------------------|
|                               | Za svaki tip primarnih elemenata (greda, stup, zid) |                           |
| Razina pregleda i ispitivanja | Postotak elemenata za kontrolu detalja              | Uzorci materijala po katu |
| Ograničena                    | 20  | 1                         |
| Opsežna                       | 50  | 2                         |
| Sveobuhvatna                  | 80  | 3                         |

**Tablica 4. Zidane zgrade: važnost istražnih radova na temelju kojih se određuje FP za daljnje proračune prema Dodatku C iz norme HRN EN 1998-3 [7]**

| Geometrijska svojstva   | Detalji   | Materijali   |
|---|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Položaj i dimenzije zidnih elemenata</li> <li>• Položaj i dimenzije otvora</li> <li>• Rasподjela gravitacijskih opterećenja</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vrsta zida</li> <li>• Kvaliteta morta</li> <li>• Količina armature serklaža (ako postoji)</li> <li>• Uvjeti spojeva zidova, stropova i krovova</li> <li>• Utvrđivanje pukotina u zidu</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ispitivanja svojstva materijala:           <ul style="list-style-type: none"> <li>- ultrazučna metoda,</li> <li>- ispitivanje udarnim odjekom,</li> <li>- radiografija i pahometar,</li> <li>- sklerometarsko ispitivanje,</li> <li>- ispitivanje plosnatim hidrauličkim prešama</li> </ul> </li> </ul> |



| FAKTOR POVJERENJA (FP)  |                          |
|---|--------------------------|
| Preporučene vrijednosti FP ovisno o razini znanja (poznatih parametara postojećega objekta) |                          |
| RZ1   | FP <sub>RZ1</sub> = 1,35 |
| RZ2   | FP <sub>RZ2</sub> = 1,20 |
| RZ3   | FP <sub>RZ3</sub> = 1,00 |

## 4.3 Odabir proračunskog modela

S obzirom da postojeće konstrukcije:

- odražavaju stanje znanja u vrijeme njihove gradnje
- moguće sadrže skrivene grube greške
- moguće su biti izložene ranijim potresima ili drugim izvanrednim djelovanjima nepoznatoga učinka, vrednovanje konstrukcije i mogući zahvati u konstrukciji podložni su različitom stupnju nesigurnosti (razina znanja) u odnosu na nove konstrukcije.

Stoga se zahtijevaju različite skupine podataka o materijalima i sigurnosti konstrukcije kao i različiti proračunski postupci koji ovise o potpunosti i pouzdanosti dostupnih podataka.

Proračunski postupci kod obnove zgrada oštećenim potresom provode se za dva slučaja: proračun postojećeg stanja i proračun ojačanog stanja. Odabir proračunske metode ovisi o složenosti konstrukcije i gore navedenim parametrima. Proračun se izvodi iterativno bez obzira na metodu. U odnosu na zatećeno stanje konstrukcije, vrši se pojačanje elemenata sve dok se ne dostigne potrebna Razina otpornosti – IZO, koja će biti detaljnije opisana u nastavku.

Indeks znatnog oštećenja (IZO).definira se kao omjer ciljane otpornosti i otpornosti za granično stanje znatnog oštećenja (poredbeno potresno djelovanje za povratno razdoblje 475 godina).

Ključan dio pri projektiranju obnove je izbor modela proračuna i pretpostavke koje se uvode u proračunski model kako bi se što točnije i kvalitetnije provela procjena.

### 4.3.1 Linearno elastičan proračun

Propis dopušta proračun metodom bočnih sila i elastičnim spektrom odziva kod kojega se ne primjenjuje faktor ponašanja. Ograničenja metode i pretpostavke navedene su u normama HRN EN 1998–1 i HRN EN 1998–3 te se ovdje neće u cijelosti ponavljati već će se ukratko opisati.

Proračun metodom bočne sile smije se primjeniti na zgrade čiji je odziv dominantan u prvom obliku titranja za svaki smjer. U skladu s time, zgrada treba zadovoljiti kriterije pravilnosti po visini. Proračun metodom elastičnoga spektra odziva treba voditi računa da se u obzir uzmu svi oblici titranja koji znatno pridonose odzivu zgrade, što znači da zbroj proračunskih modalnih masa iznosi najmanje 90 % ukupne mase konstrukcije za svaki smjer. Također treba uzeti u obzir utjecaj ekscentričnosti mase kata za svaki smjer. Važno je naglasiti da pri provjeri linearnim metodama granično stanje nije ispunjeno ako bar jedan nosivi element prekorači nosivost. Kod toga je svakako bitno imati inženjersku prosudbu o utjecaju tog elementa na konstrukciju u cjelini, globalno ponašanje zgrade i ugrozu koju popuštanje tog zida može predstavljati za ljudske živote. Tu treba voditi računa i o robustnosti statičkoga sustava u kojem bi se eventualna preraspodjela opterećenja mogla ostvariti, a time i rasteretiti takav element. Povoljna je okolnost da propis dopušta ograničenu preraspodjelu sila za nearmirano zidu prema kojoj se prečna sila u bilo kojem zidu ne smije smanjiti za više od 25 % niti povećati za više od

33 %, ali uz uvjet da resultanta ostane jednaka (isti intenzitet i položaj pravca sile). Ova preraspodjela vrijedi samo u konstrukcijama s krutim dijafragmama, dok je kod fleksibilnih dijafragmi preraspodjela dopuštena samo među zidovima u jednoj ravnini koji su međusobno povezani armiranobetonskim gredama. Bitno je naglasiti da propis dopušta primjenu samo linearnih metoda kod najniže razine znanja (faktor povjerenja 1,35), dok se kod ostalih razina mogu primijeniti i nelinearni proračuni.

#### **4.3.2 Nelinearan proračun**

Metoda postupnoga guranja nelinearna je proračunska metoda koja pretpostavlja tečenje materijala i preraspodjelu sila u konstrukciji. Obično je dovoljna samo materijalna nelinearnost, iako je ponekad nužno uzeti u obzir i geometrijsku ( $P-\delta$  utjecaj). Ta se metoda može realizirati modelima različite složenosti, ali prije svega je predviđena za jednostavne modele u kojima je plastičnost koncentrirana u unaprijed određenim i poznatim područjima. Kod standardnih zgrada sa zidnim konstrukcijskim sustavom to su uglavnom elementi zidova i nadvoja. U osnovi je metoda jednostavna i provodi se tako da se konstrukcija uravnoteži za vertikalno opterećenje te se nakon toga optereti statičkim bočnim horizontalnim opterećenjem koje predstavlja opterećenje inercijalnim silama zbog potresa. Bočno opterećenje zatim se kontinuirano povećava sve dok konstrukcija ne dosegne traženo granično stanje. Zahtjev je da se postupak provede sve do vrijednosti pomaka kontrolnogaa čvora u iznosu 150 % ciljanoga pomaka dobivenoga na temelju elastičnoga spektra odziva i ekvivalentnoga sustava s jednim stupnjem slobode. Kriterij dosezanja graničnog stanja povezan je sa zahtijevanim pomakom. Obično je to globalni pomak ili međukatni pomak koje je povezan s razinom oštećenja konstrukcije. U HRN EN 1998–1 se kao standardna metoda predviđa N2 metoda postupnoga guranja [6].

Nelinearni proračun metodom postupnog guranja uvažava otkazivanje nosivosti slabijih elemenata po redoslijedu do desezanja graničnog pomaka. Nakon otkazivanja preraspodjela, te daljnje povećanje opterećenja prenose preostali nosivi elementi koji nisu otkazali. Takav slijed nosivosti konstrukcije zaista odgovara stvarnom potresu koji se manifestira u kontinuiranom otkazivanju elemenata prilikom oštećenja konstrukcije.

Opisanom metodom utvrđuje se točni kapacitet nosivosti konstrukcije za razliku od Linearnog proračuna i time je preciznija metoda za analizu postojećeg stanja, posebno nepravilnih zidanih zgrada.

### **4.4 Osnovna načela potresne obnove konstrukcije**

Odabir tipa, tehnike, opsega i hitnosti zahvata potresne obnove mora se temeljiti na prikupljenim podacima o konstrukciji tijekom ocjenjivanja zgrade. U obzir treba uzeti sljedeća pitanja:

- sve ustanovljene grube greške treba prikladno otkloniti
- kod vrlo nepravilnih zgrada (s obzirom na krutost i raspodjelu povećane čvrstoće) treba što je više moguće poboljšati pravilnost konstrukcije po visini i u tlocrtu
- zahtijevane značajke za pravilnost i otpornost mogu se postići prilagodbom čvrstoće i/ili

krutosti odgovarajućeg broja postojećih elemenata ili uvođenjem novih konstrukcijskih elemenata

- ostvarenje povećane sposobnosti mjesne duktelnosti, ako se zahtijeva
- povećanje čvrstoće nakon zahvata ne treba umanjiti raspoloživu globalnu duktelnost
- posebno za zidane zgrade: neduktilne nadvoje treba zamijeniti, neprikladne spojeve stropa i zidova treba poboljšati, treba eliminirati horizontalne potiske okomito na ravninu zidova.

Kao i pri projektiranju novih konstrukcija, optimalne odluke postižu se kad se u obzir uzmu društveni aspekti, kao ometanje pri upotrebi ili zauzetost tijekom zahvata.

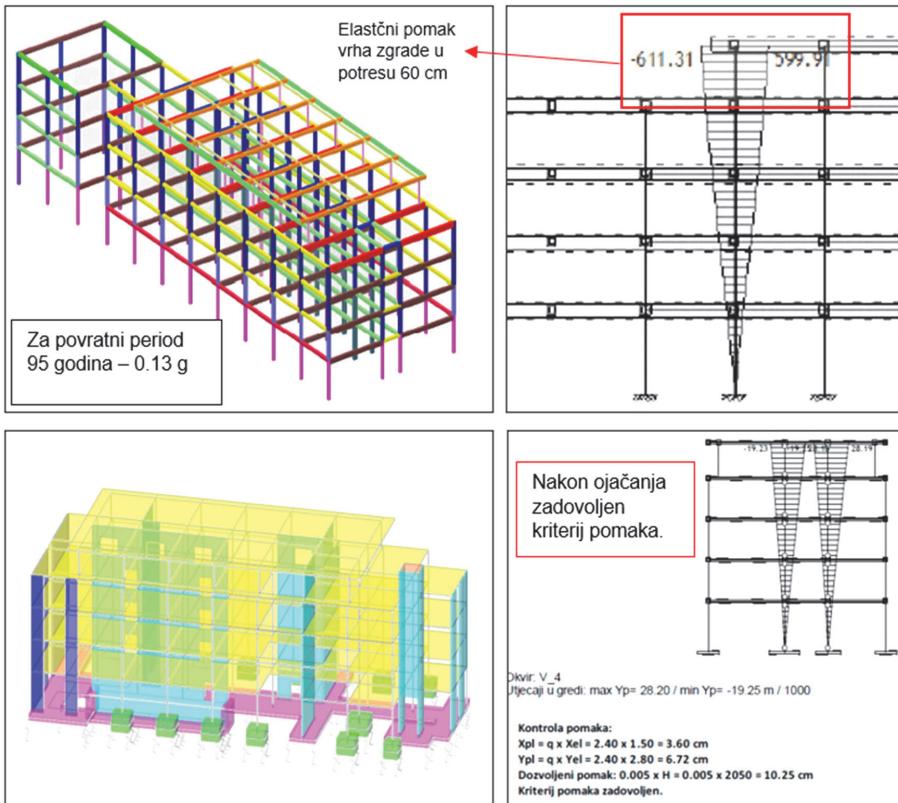
Sukladno važećem Zakonu o gradnji, za intervencije prilikom kojih se mijenjaju lokacijski uvjeti ili temeljni zahtjevi za građevinu (isti se ne poboljšavaju, već se mijenjaju tehnička rješenja) potrebno je ishoditi adekvatan akt za građenje, tj. građevinsku dozvolu. Za zgrade kod kojih se nakon provedbe radova na sanaciji kojima se poboljšava ispunjavanje temeljnih zahtjeva za građevinu te izvanredno održavanje građevine, a kojima se ne mijenja usklađenost te građevine s lokacijskim uvjetima u skladu s kojima je izgrađena; potrebno je provesti i ishođenje uporabne dozvole te glavni projekti moraju imati potvrde javnopravnih tijela propisane posebnim propisima. Time je potrebno kod izrade glavnog projekta ishoditi i posebne uvjete, tj. po završetku glavnog projekta/projekata i potvrdu/potvrde o usklađenosti s posebnim uvjetima, a prije započinjanja sa izvođenjem radova.

#### **4.4.1 Tipovi zahvata**

Neki od tipova zahvata koji se provode u svrhu ojačanja postojećih konstrukcija:

- lokalna ili opća prilagodba oštećenih ili neoštećenih elemenata (popravak, pojačanje ili potpuna zamjena), uzimajući u obzir krutost, čvrstoću i/ili duktelnost tih elemenata
- dodavanje novih konstrukcijskih elemenata (npr. ukrućenja ili ispunskih zidova; čeličnih, drvenih ili armiranobetonskih serklaža u zidane konstrukcije; itd.)
- prilagodba konstrukcijskog sustava (eliminiranje nekih konstrukcijskih spojeva; proširenje čvorova; izbacivanje oštetljivih elemenata; prilagodba i stvaranje pravilnijeg i/ili duktilnijeg rasporeda)
- dodavanje novog konstrukcijskog sustava koji može preuzeti dio ili cijelo potresno djelovanje
- moguća pretvorba postojećih nekonstrukcijskih elemenata u konstrukcijske
- uvođenje pasivnih zaštitnih uređaja kao duktilnih ukrućenja ili izolacije u podnožju
- smanjenje mase
- ograničenje ili promjena namjene zgrade
- djelomično rušenje.

Na slici 10. prikazan je primjer iz prakse ojačanja armiranobetonske konstrukcije Fakulteta strojarstva i brodogradnje iz razdoblja gradnje oko 1958. godine. Rađena je analiza postojećeg stanja i ojačanog stanja kojom je pokazano da su ojačanjima (novi armiranobetonski zidovi) umanjeni ukupni pomaci i dovedeni na propisom prihvatljivu razinu.



Slika 10. Analiza otpornosti postojećeg stanja i ojačanog stanja na primjeru iz prakse – Fakultet strojarstva i brodogradnje [7]

#### 4.4.2 Tehnike popravaka i pojačanja konstrukcije sa primjerima iz prakse

Zbog potresa se mogu pojaviti znatna oštećenja zida koja zahtijevaju da se dio zida potpuno ukloni i ponovno izvede. U takvim slučajevima važno je odmah izvesti privremeno podupiranje međukatnih konstrukcija i zidova koji se nalaze iznad onih dijelova zida koji se trebaju ukloniti. Za popravke i ojačanja zidova koje nije potrebno potpuno ukloniti koriste se neke od sljedećih metoda:

- ponovno zidanje dijela zida
- djelomična zamjena morta u sljubnicama
- Armiranje sljubnica
- injektiranje zidova
- povezivanje zidova: prošivima, čeličnim zategama, izvedbom serklaža
- pojačanje zidanih zgrada oblogama od vlakana armiranih polimera (eng. *Fibre reinforced polymer*, FRP) ili oblogom od armirane cementne matrice (eng. *Fabric reinforced cementitious matrix*, FRCM)
- izvedba armirane žbuke na zidovima (torkretiranje).

Neke od navedenih metoda ojačanja prikazane su na slici 11. primjerima iz prakse.

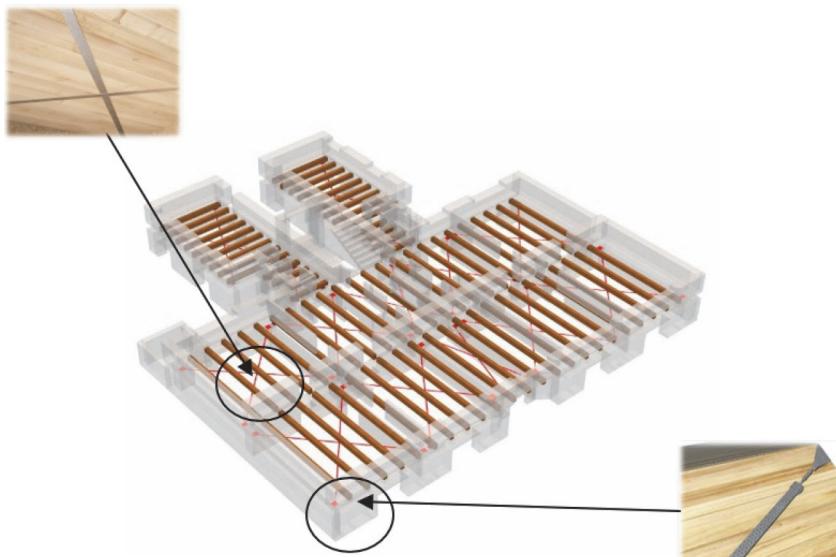


Slika 11. Primjeri iz prakse: a) torkret zidova, b) izvedba novih AB serklaža; c) izvedba FRCM sustava [8]

Postupak protupotresnoga projektiranja ojačanja konstrukcije osim ojačanja nosivih zidova zahtjeva pojačanje međukatnih konstrukcija kako bi se ponašale kao krute dijafraze u svojoj ravnini što je izazuzno bitno u protupotresnoj otpornosti cijele građevine. Konstrukcijski zahvati na drvenim stropnim konstrukcijama, koje su na našem području najzastupljenije u starim zgradama, općenito se mogu podijeliti u sljedeće skupine: pojačanja grednika, povezivanje stropa sa zidovima i lokalne intervencije. Na slikama 12. i 13. prikazati ćemo neke od primjera iz prakse koje se koriste u ojačavanju međukatnih konstrukcija.



Slika 12. Izvedba spregnutog stropa čelik/beton iznad bačvastog zidanog svoda [7]



Slika 13. Vizualizacija izvedbe horizontalnog diska-spregovis perforiranim limom (lijevo) i fotodokumentacija izvedbe tlačne ploče iznad drvenog stopa sa detaljom veze ojačane konstrukcije i zidova (desno) [8]

#### 4.4.3 Primjer obnove zidane zgrade na razinu 3

U sljedećem primjeru će se prikazati primjer projekta obnove konstrukcije karakteristične stambeno-poslovne donjogradske zgrade kojom je cilj bio doseći razinu 3 otpornosti na potresna djelovanja prema Tehničkom propisu za građevinske konstrukcije.

Predmetna građevina se nalazi u centru grada Zagreba u Masarykovoј ulici. Izvorna zgrada je izvedena 1925. godine kada nisu postojali tehnički propisi za projektiranje i proračun konstrukcija na djelovanje potresa. Katnost zgrade je Po+Pr+5+Pt što je ukupno 8 etaža. Tlocrtno je nepravilnog oblika (slika 14.). Građevina je sa svih strana naslonjena susjedne građevine, izuzev uličnog pročelja. Kroz prizemlje građevine nalazi se prolaz, odnosno kolni pristup za vozila i pješake. Uvidom u arhivske nacrte zaključeno je kako je građevina tokom uporabe doživjela mnoge izmjene i rekonstrukcije.

Postojeća konstrukcija zgrade je karakteristična za to razdoblje gradnje. Nosivi zidovi su izvedeni kao neomeđeno ziđe od pune opeke. Međukatne konstrukcije su klasični drveni stropovi, osim dijelova gdje je u naknadnim intervencijama izvedena zamjenska AB ploča ili spregnuta ploča. Krovište je klasično dvostrešno drveno krovište.

Zatečeno stanje ukazuje na mnogo nepovoljnih karakteristika konstrukcije. Izvorno je građevina imala "meko" prizemlje, malo zidova u poprečnom smjeru te nedostatak horizontalnih dijafragmi. Naknadnim intervencijama na građevini (probijanjem novih otvora u prizemlju) tokom uporabnog vijeka je dodatno pogoršan efekt mekog prizemlja. Zatečeno stanje zidova je loše – istrošenost materijal i velika oštećenja uslijed niza potresa.



Slika 14. Fotografija pročelja zgrade (lijevo), Pročelje zgrade iz arhivske građe i fotografije zatečenih oštećenja (sredina); Tlocrt prizemlja i karakterističnog kata (desno) [8]

Na građevini je nakon potresa bilo potrebno izvesti urgentne mjere uklanjanja opasnih dijelova građevine koji su predstavljali prijetnju od urušavanja nakon potresa. U zgradi se nalazi javni prolaz koji je ujedno i kulturno dobro upisano Registar kulturnih dobara RH - zbog posljedica urušavanja prolaza ciljana razina obnove je Razina 3 - pojačanje konstrukcije.

U sklopu elaborata ocjene postojećeg stanja građevinske konstrukcije izvršen je proračun radi procjene nosivosti građevine. Proračun je izvršen pojednostavljeno linearnom metodom koristeći modalni proračun primjenom spektra odziva sa faktorom ponašanja. Zaključeno je kako građevina ima iznimno malu nosivost na potresno djelovanje.

Tablica 5. Rezultati ocjene postojećeg stanja – 18% nosivosti za razinu 3 (IZO=0,75)

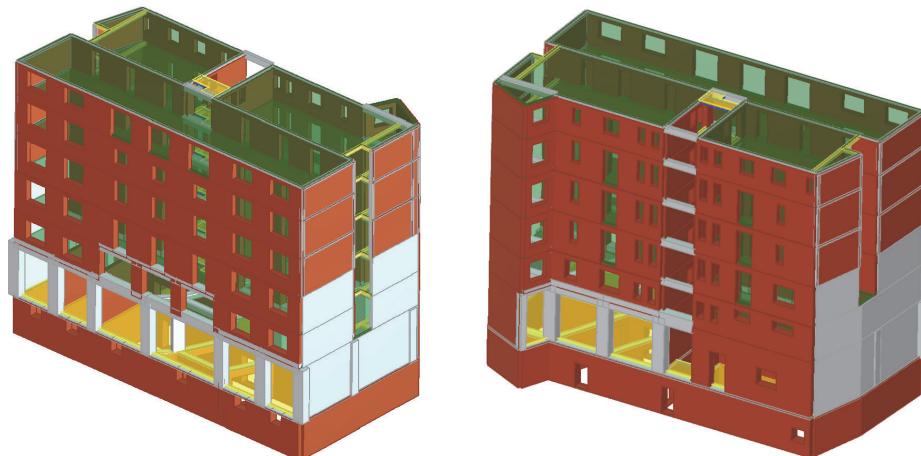
| Rekapitulacija dimenzioniranja zidova od opeke |                        |         |                        |         |
|--|------------------------|---------|------------------------|---------|
| Etaža  | Razina 2 agR = 0,126 g |         | Razina 3 agR = 0,181 g |         |
|  | X-smjer                | Y-smjer | X-smjer                | Y-smjer |
| Prizemlje                                      | 0,58                   | 0,26    | 0,40                   | 0,18    |

Predviđen je niz zahvata kojima se planira ojačati postojeću konstrukciju:

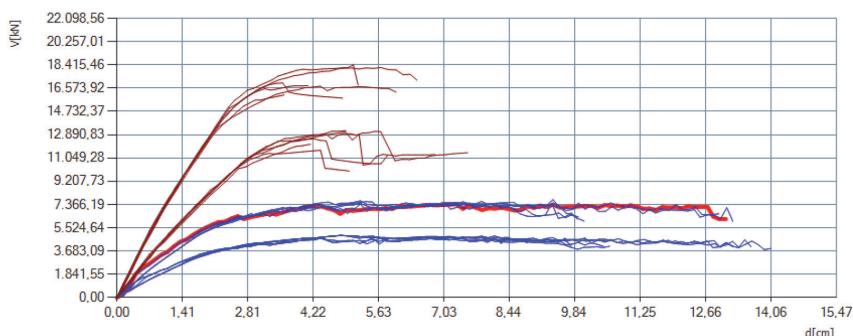
- uklanjanje pregradnih zidova od opeke i izvedba laganih "gipskartonskih" zidova
- izvedba AB tlačne ploče u razinama međukatnih konstrukcija (sprezanje drvo + AB ploča 6 cm) i sidrenje sa postojećim zidovima - uklanjanje postojećih slojeva poda i izvedba novih
- ojačanje postojećih nosivih zidova FRCM/TRM i FRP sustavom
- dodavanje novih zidova od opeke u podrumu i prizemlju
- ojačavanje okvira u prizemlju izvedbom nove AB obloge
- uklanjanje postojećih zabatnih zidova do kote podruma i izvedba novih od armiranog betona i opeke

- ojačanje podrumskih zidova AB oblogom kao i pripadajućih temelja
- sanacija pukotina u postojećim zidovima.

U samom projektu obnove korišten je nelinearni proračun "postupnim guranjem" (Pushover metoda) koji se temelji na EFM metodi (metoda ekvivalentnih okvira). Korišten je programski paket 3Muri.



Slika 15. Prikaz proračunskog modela u programskom paketu 3Muri [8]



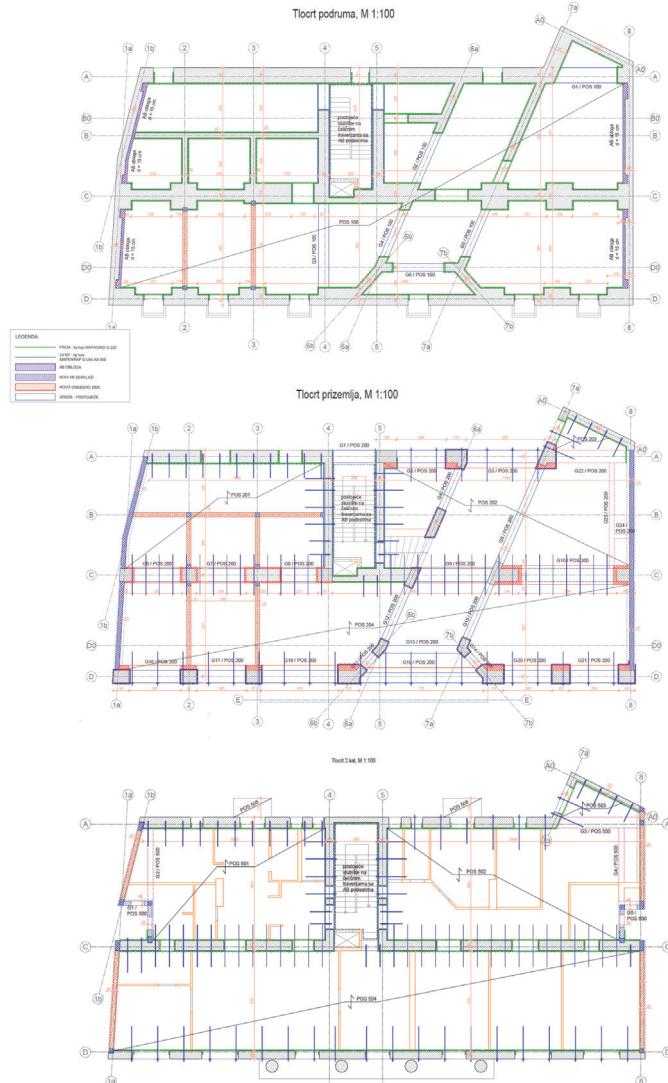
Slika 16. Prikaz krivulja postupnog guranja (plavo uzdužni smjer, smeđe poprečni smjer) [8]

Proračunom nelinearnog proračuna ojačane građevine za zidove u poprečnom smjeru je zaključeno sljedeće:

- najveći dio preuzimaju zabatni zidovi (kruti AB zidovi bez otvora)
- otkazivanje savijanjem u podnožju – gotovo linearno ponašanje

Za zidove u uzdužnom sjeru je zaključeno sljedeće:

- zidovi su perforirani s mnogo otvora
  - postupno otkazivanje parapeta i nadvoja i preraspodjela na druge nosive elemente koji mogu preuzeti veću silu (velika duktilnost)
  - kritične elemente predstavljaju okviri u prizemlju, prije svega naknadno oslabljeni dijelovi građevine
  - po pojavi jačeg potresa očekuju se oštećenja na zidovima građevina, ali će ista biti ograničena uvjetima prema graničnom stanju značnog oštećenja (ZO) koje se kontrolira.



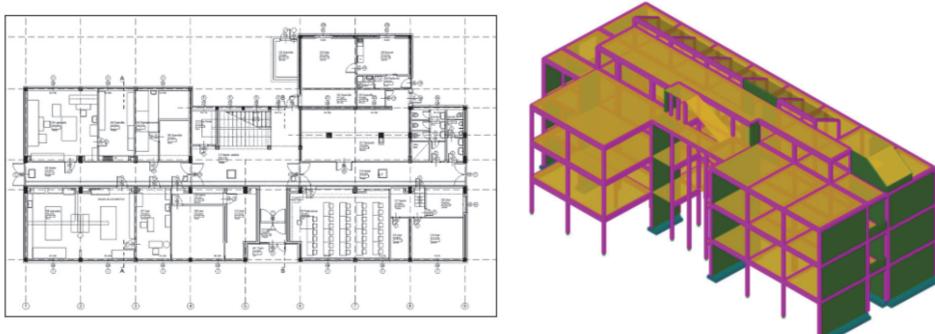
Slika 17. Tlocrtni prikaz zahvata obnove [8]

Na ovom primjeru vidimo kako osiguranje potresne otpornosti građevinama sa izvornim i stečenim nedostacima predstavlja složen poduhvat. Građevinu nije moguće vratiti u "izvorno" stanje ukoliko želimo osigurati veću potresnu otpornost, već je neophodno izvesti složenije zahvate pojačanja konstrukcije građevine.

#### 4.4.4 Primjer obnove armiranobetonske zgrade na razinu 3

U sljedećem primjeru će se prikazati primjer projekta cijelovite obnove zgrade paviljona I Agronomskog fakulteta u Zagrebu. Građevina je približno pravokutnog tlocrtnog oblika sa tlocrtnim istakama. Katnost zgrade je  $Pr+2k+Pk$  (uvučena etaža). Ciljana razine obnove je razina 3 prema Tehničkom propisu za građevinske konstrukcije.

Predmetna građevina je izvedena 1932. godine kada nisu postojali tehnički propisi za projektiranje i proračun konstrukcija na djelovanje potresa. Izvornu nosivu konstrukciju čini sustav povezanih armiranobetonskih stupova i greda. Okvirni sustav sastoji se od glavnih uzdužnih greda na fasadnim i unutarnjim stupovima. Između okvira izvedeno je ispunsko zide od pune opeke koje je doprinijelo krutosti građevine i sudjelovalo u disipaciji seizmičke energije te na taj način doživjelo znatna štećenja uslijed potresnog djelovanja. Međukatna konstrukcija je armiranobetonska, tzv. sitnorebričasti strop koji je izведен monolitno te su rebra povezana s tlačno betonskom pločom debljine 5 cm. Temeljna konstrukcija nije u potpunosti poznata. Prema arhivskim nacrтima i proračunskim prepostavkama, stupovi su temeljeni na temeljima samcima, dok su po obodu građevine izvedene vezne grede. Napravljena je analiza nosivosti postojeće konstrukcije u kojoj je ustanovljeno da postojeća konstrukcija nema dovoljan kapacitet nosivosti na seizmička djelovanja za traženu razinu obnove.



Slika 18. Tlocrt prizemlja paviljona 1 – postojeće stanje (lijevo); Proračunski model ojačane konstrukcije paviljona 1 (desno) [8]

Podaci o materijalima u postojećoj konstrukciji su dobiveni na temelju istražnih rada. Proračun ojačane konstrukcije proveden je linearnom metodom koristeći modalni proračun primjenom spektra odziva sa faktorom ponašanja. Kako bi se postojeća konstrukcija dovela u stanje zadane razine otpornosti neophodno je provesti sljedeće konstruktivne zahvate:

- uklanjanje svih zidnih obloga i žbuka, uklanjanje podgleda na stropovima
- uklanjanje većeg dijela pregradnih zidova
- izvedba novih jezgri i armirano betonskih zidova
- ojačanje postojeće dijafragme uslijed seizmičkog djelovanja
- lokalna sanacija postojećih armiranobetonskih elemenata u zonama oštećenja
- sanacija postojećih zidova od opeke u zonama oštećenja FRCM (TRM) sustavom te injektiranjem prema potrebi.

Na slikama 19. do 21. prikazane su fotografije izvedbe navedenih tehničkih rješenja iz faze izvedbe.



Slika 19. Izvođenje novih temelja unutar postojećeg objekta [8]



Slika 20. Izvođenje novih armiranobetonskih zidova unutar postojećeg objekta [8]



Slika 21. Povezivanje armature novih armiranobetonskih zidova kroz postojeće grede [8]

## 5 Konzervatorski uvjeti

Velika većina oštećenih građevina na području grad Zagreba su stare zgrade koje su zaštićene kao kulturna dobra. Sukladno Zakonu o očuvanju kulturnih dobara za takve zgrade, kulturna dobra, potrebno je izdati suglasnot na projekt obnove. Konzervatorske smjernice za obnovu zgrada nakon potresa temelje se uglavnom na Dokumentu: "GENERALNI URBANISTIČKI PLAN GRADA ZAGREBA, KONZERVATORSKA PODLOGA, Opći i posebni uvjeti zaštite i očuvanja nepokretnih kulturnih dobara, izmjena i dopuna 2015". Za zgrade koje su od posebnog interesa Ministarstva kulture i njihovih stručnih službi potrebno je prije početka izvođenja radova na sanaciji i obnovi za Glavne projekte izrađene za potrebe sanacije i obnove ishoditi i potvrditi o usklađenosti sa posebnim uvjetima koji su inicialno ishodjeni od nadležnog konzervatorskog odjela Ministarstva kulture, tj. Gradskog zavoda za zaštitu spomenika kulture i prirode za područje Grada Zagreba.



Slika 22. Primjeri zaštićenih kulturnih dobara

## 5.1 Izuzeće od ispunjenja temeljnog zahtjeva

Prema izmjeni Tehničkog propisa za građevinske konstrukcije izuzeće od ispunjenja temeljnog zahtjeva mehaničke otpornosti i stabilnosti za obnovu propisano je za spomenike kulture od nacionalne važnosti prema članku 16. stavka 1. Zakona o gradnji (»Narodne novine«, broj 153/13, 20/17, 39/19 i 125/19).

Uz suglasnost Ministarstva može se odstupiti od temeljnih zahtjeva za građevinu ako bi se njime narušila bitna spomenička svojstva. Kako nebi došlo do devastacije kulturnih dobara od nacionalne važnosti uz dopuštena tehnička rješenja obnove sa kojima je su-glasan konzervator i projektant mehaničke otpornosti i stabilnosti takve građevine ne mogu se uvijek pojačati na zahtjevanu razinu prema HRN RN 1998-1.

## 5.2 Problematika pri provođenju konzervatorskih uvjeta

Nakon potresa svjedoci smo i niza oštećenja na zgradama s recentno obnovljenim pročeljima, izvedenim prema konzervatorskim uvjetima, ali bez neophodne konstruktivne sanacije i obnove. Dio obnovljenih fasada će nakon potresa morati ponovno biti obnovljen.

Kako bi sačuvali graditeljsku baštinu, neizostavno je potrebno, pored konzervatorskih uvjeta, obnovu oštećenih zgrada provesti i prema bitnim kriterijima i uvjetima mehaničke otpornosti i stabilnosti, kako bi se građevine osigurale na djelovanja budućih potresa. Stoga ćemo u nastavku navesti problematiku pri provođenju konzervatorskih uvjeta prilikom izvedbe projekta obnove.

Oštećene građevine izvedene su u vrijeme nedovoljnog znanja o potresnim djelovanjima i bez provedbe ikakvih proračuna i provjera na potres, tako da sve oštećene zgrade sadrže izvore nedostatke i grube konceptualne greške. Takve građevine nije moguće "obnoviti u izvornom povjesnom obliku njihovih konstrukcija" uz korištenje "izvornih gradiva" za konstrukciju, a da se postigne propisana i potrebna protupotresna otpornost.

Zidovi zgrada starijih od 50-ak godina izvedeni su uglavnom od neomeđenog zida, skladno vremenu u kojem su građene, a sadrže i druge bitne izvorne nedostatke ukupne strukture zidova (nedovoljna otpornost, nepravilnosti u tlocrtima i po visini, nadvoji od običnog zida te drugi nedostaci). Analize i proračuni, koji su već izrađeni, pokazuju da je neophodno izvođenje bitnih zahvata ojačanja zidova, kao što su: dodatne torkretne obloge, ugradnja ab. serklaža, FRP-ojačanja, dopuna novim zidovima i slično. Sukladno konzervatorskim smjernicama kojima se ne dopuštaju intervencije novih materijala ili zadiranje u izvorne/graditeljske i oblikovne karakteristike zgrada ne moguće je zadovoljiti temeljne zahtjeve za građevinu.

Za postići propisanu i potrebnu protupotresna otpornost potrebno je konzervatorskim smjernicama predvidjeti mogućnost intervencija i odstupanje od "izvornih materijala i izvornog-povjesnog oblikovanja" kada je to potrebno da bi se udovoljilo temeljnom zahtjevu za građevinu – mehanička otpornost i stabilnost.

Kod teže oštećenih građevina i obnove prema zakonskim okvirima, neophodni su sljedeći globalni zahvati:

- neophodno ukloniti zidne obloge, žbuke, fasade
- neophodno ukloniti podne obloge, podglede
- neophodno zamijeniti i većinu instalacija
- ostaje neadekvatna vertikalna konstrukcija – neomeđeno oštećeno zidje, koje je potrebno dodatno radikalno rekonstruirati; sanirati sva oštećenja te dodatno bitno ojačati i često dopuniti novim zidovima
- navedenom treba dodati potrebu korijenite rekonstrukcije stropnih konstrukcija, svih spojeva i veza u konstrukciji te ukupne konstrukcije u zoni krovišta.

Na osnovu već izrađenih konceptualnih rješenja mogućih tehničkih rješenja obnove pojedinih teško oštećenih zgrada, zatim provedenih proračuna, izrađenih troškovnika te izvršenih usporednih analiza, vidljivo je da je navedeni način obnove uz zadržavanje izvorne strukture zidova, izrazito zahtjevan zbog potpunog iseljenja, finansijskih troškova kao i potrebnog dužeg vremena za izvođenje.

## 6 Energetska obnova

Prema Zakonu o obnovi zgrada oštećenih potresom (NN 102/20, 10/21 i 117/21) cjelovita obnova obuhvaća i zadovoljavanje temeljnih zahtjeva vezanih uz gospodarenje energijom i očuvanje topline.

Građevine i njihove instalacije za grijanje, hlađenje, osvjetljenje i provjetravanje moraju biti projektirane i izgrađene tako da količina energije koju zahtijevaju ostane na niskoj razini, uzimajući u obzir korisnike i klimatske uvjete smještaja građevine. Građevine također moraju biti energetski učinkovite, tako da koriste što je moguće manje energije tijekom građenja i razgradnje [9].

Kroz Nacionalni plan oporavka i otpornosti 2021.-2026. (u daljem tekstu NPOO) osigurana su sredstava za energetsku obnovu stambenih zgrada.

### Energetska učinkovitost

Poboljšanje energetske učinkovitosti može se ostvariti kroz više različitih mjera energetske obnove, a to su mjere koje mogu biti zahvati na ovojnici zgrade i zahvate na tehničkim sustavima. Zahtjevi koji su postavljeni za energetsku obnovu zgrada oštećenih u potresu su smanjenje za 50% toplinske energije za grijanje ( $Q_{H,nd}$ ) i/ili primarne energija ( $E_{prim}$ ). Za zgrade koje su dio kulturne baštine taj zahtjev je smanjenje od 30%.

Česta pojava je da se kod zgrada ne može dirati ovojnica zgrade zbog uvjeta konzervatorske zaštite. U takvim slučajevima moguće intervencije povećanja energetske učinkovitosti (smanjenja toplinske energije za grijanje) mogu biti izoliranje poda prema tlu, izoliranje krova odnosno izoliranje prema negrijanom prostoru (tavan) te zamjena stolarije. Smanjenje primarne energije ostvaruje se zahvatima na strojarskim instalacijama odnosno zamjenom postojećih sustava grijanja i hlađenja sa novim sustavima poput dizalica topline. Takvi sustavi imaju veću učinkovitost u radu.

## Projekti instalacija

U sklopu cijelovite obnove važna komponenta su i projekti instalacija. Mnoge javne građevine imaju zastarjele sustave za grijanje i hlađenje koji su često neracionalni potrošači energije. Uvođenjem novih efikasnijih sustava smanjuju se troškovi za grijanje i hlađenje, a i s konzervatorskog stajališta mogu se ostvariti povoljnija rješenja (ukidanje vanjskih klima jedinica na pročeljima, pozicioniranje centralnih uređaja na manje vidljivo mjesto).

## 7 Zaštita od požara

Izmjenama Zakona o obnovi zgrada oštećenih potresom (NN 102/20, 10/21 i 117/21) definirano je da je cijelovitom obnovom obvezno osiguranje temeljnih zahtjeva za građevine koji se odnosi na mehaničku otpornost i stabilnost te gospodarenje energijom i očuvanje topline, a da se drugi temeljni zahtjevi ispunjavaju samo ako je to moguće bez znatnijih zahvata na zgradama i značajnog povećanja troškova [1]. Prema tome je dopušteno da se pojedini temeljni zahtjevi ne ispune. Jedan od najvažnijih temeljnih zahtjeva je zaštita od požara. Sve zahtjeve zaštite od požara je teško ispuniti na postojećim građevinama, pogotovo na građevinama u starim gradskim jezgrama gdje je često nemoguće ostvariti prikladne požarne pristupe prema današnjim standardima zaštite od požara. Iako Zakon o obnovi zgrada oštećenih potresom (NN 102/20, 10/21 i 117/21) ne obvezuje ispunjavanje svih uvjeta zaštite od požara, svakako je potrebno osigurati najvažnije mјere zaštite od požara. U prvom redu to je evakuacija. Prva mјera je osiguranje dovoljnog broja evakuacijskih putova i izlaza, požarno odjeljivanje stubišta, te osiguranje dodatnih vanjskih stubišta ukoliko se ne mogu u okviru postojeće zgrade osigurati evakuacija. Potrebno je napomenuti kako taj zahvat nije moguće izvesti kroz projekt obnove već je potrebno ići na građevinsku dozvolu.



Slika 23. Primjer vatrogasnog fotoelaborata [7]

Nakon evakuacije svakako bitna mjera je osiguranje požarnog pristupa građevini kako bi se omogućilo efektivno gašenje požara. Kod postojećih građevina često je teško ostvariti pravila požarnog pristupa prema Pravilniku o uvjetima za vatrogasne pristupe (NN 35/94, 55/94, 142/03). U takvim slučajevima moguće je upotrijebiti individualan pristup svakoj situaciji i empirijski dokazati mogućnost pristupa vatrogasnog vozila. U nastavku je prikazan izvod iz vatrogasnog fotoelaborata kojim se dokazuje mogućnost pristupa vatrogasnog vozila građevini koja ne zadovoljava parametre iz Pravilnika.

## 8 Zaključak

Ovaj rad predstavlja pregled trenutnog zakonskog okvira i inženjerskog pristupa cijelovitoj obnovi zgrada oštećenih u potresu. Prikazane su specifičnosti proračunskih metoda u građevinskom projektu obnove koje se koriste za dokazivanje nosivosti postojeće i ojačane konstrukcije. U tom području obnova predstavlja izazov za inženjere zbog veće kompleksnosti spram projektiranja novih građevina. Preporučeno je izvesti opsežne istražne radove, provoditi zahtjevnije proračune, a često je potrebno koristiti i nelinearne proračunske metode koje dosada nisu bile zastupljene u inženjerskoj praksi u Republici Hrvatskoj. Cijelovitu obnovu čini i energetska obnova, a poželjno je poboljšati zadovoljavanje zaštite od požara i drugih temeljnih zahtjeva za građevinu. Takav cijeloviti pristup obnovi građevina je svakako preporuka za buduće održavanje građevina koje nisu bile oštećene u potresu. Izvoditi samo energetsku obnovu postojećih građevina koje nemaju zadovoljavajuću otpornost na potresna djelovanja nije logično s obzirom da je sigurnost ljudi te mehanička otpornost i stabilnost u potresu veći prioritet od ostalih temeljnih zahtjeva za građevinu.

Iako je poznato da je cijelo područje Republike Hrvatske seizmički aktivno, potres koji se dogodio u Zagrebu 22.03.2020. nas je "iznenadio", a kasniji potres 29.12.2020. kod Petrinje je dodatno potvrdio koliku opasnost potres predstavlja za ljudske živote i imovinu. Građevinska struka je na svojim skupovima i kroz stručne radove godinama upozoravala na rizik od potresa, neadekvatnu brigu o problemu potresne otpornosti postojećih građevina te nedostatak strategije za reduciranje rizika od potresa. Naša građevinska struka je na novoizgrađenim građevinama dokazala da posjeduje znanje projektiranja, nadzora i izvođenja potresno otpornih i sigurnih građevina jer u pregledima nakon potresa nisu uočena oštećenja, ili su uočena tek neznatna nekonstruktivna oštećenja.

Tokom dužeg razdoblja nakon potresa nije postojala jasna strategija i zakonski okviri za pristupanje obnovi. Danas, iako i dalje nedovoljno, imamo prve zakonske okvire po kojima možemo pristupiti obnovi. Svakako je potrebno u suradnji sa strukom dalje unaprjeđivati propise i raditi na strategiji reduciranja potresnog rizika u budućnosti. Potrebno je omogućiti još bolju edukaciju inženjera u području potresne obnove. Diljem Lijepe naše postoje područja visoke seizmičke aktivnosti na kojima postoje mnoštvo postojećih građevina sa nedovoljnom potresnom otpornosti. Ne trebamo čekati novi potres kako bi strateški pristupili prevenciji posljedica potencijalnih potresa u budućnosti.

## Literatura

- [1] Zakon o obnovi zgrada oštećenih potresom na području Grada Zagreba, Krapinsko-zagorske županije, Zagrebačke županije, Sisačko-moslavačke županije i Karlovačke županije (NN 102/20, 10/21 i 117/21)
- [2] Program mjera obnove zgrada oštećenih potresom na području Grada Zagreba, Krapinsko-zagorske županije, Zagrebačke županije, Sisačko-moslavačke županije i Karlovačke županije (NN 88/22)
- [3] <https://www.hcpi.hr/>
- [4] Tehnički propis za građevinske konstrukcije (NN 17/17, 75/20 i 7/22)
- [5] Pravilnik o sadržaju i tehničkim elementima projektne dokumentacije obnove, projekta za uklanjanje zgrade i projekta za građenje zamjenske obiteljske kuće oštećenih potresom na području Grada Zagreba, Krapinsko-zagorske županije i Zagrebačke županije (127/20)
- [6] Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu: *Potresno inženjerstvo, Obnova zidanih zgrada*, Zagreb, 2021.
- [7] Kovač, D.: Projektna i fotodokumentacija projektnog ureda Capital Ing d.o.o., Zagreb, 2021.-2022.
- [8] Todorić, M.: Projektna i fotodokumentacija projektnog ureda Toding d.o.o., Zagreb, 2021.-2022
- [9] Zakon o gradnji (NN 153/13, 20/17, 39/19, 125/19)





## Procjena stanja i obnova postojećih građevina - ARES projekt

Autor:  
Doc.dr.sc. Mislav Stepinac

Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet

## Procjena stanja i obnova postojećih građevina - ARES projekt

Mislav Stepinac

### Sažetak

U radu su prikazani osnovni problemi procjene stanja postojećih građevina. Dan je osvrt na problematiku područja nakon potresa koji su pogodili Republiku Hrvatsku u 2020. godini. Detaljno je predstavljen znanstveni projekt ARES te su izloženi dosadašnji rezultati. Prikazane su i buduće aktivnosti te iznešene osnovne ideje za razvoj struke i znanosti u području procjene postojećih konstrukcija.

**Ključne riječi:** *procjena stanja, zidane konstrukcije, drvene konstrukcije, potres, nedestruktivne metode, studije slučaja, rizik*

### Assessment and rehabilitation of existing structures – The ARES project

#### Abstract

The paper presents the basic problems of condition assessment of existing buildings. Problems in the process of renovation of existing buildings after two earthquakes in Croatia are presented. The scientific project ARES has been elaborated in detail and the so far results are presented. Future activities are given and basic ideas for the profession and science in the field of assessment of existing structures are discussed.

**Key words:** *assessment, masonry structures, timber structures, earthquake, non-destructive methods, case studies, risk*

## 1 Uvod

Prema rezultatima sistematskog istraživanja statističkih godišnjaka, hrvatski nacionalni građevinski fond se sastoji od oko 800 000 stambenih te 125 000 nestambenih građevina [1]. Više od 75 % zgrada starije je od 30 godina što predstavlja vrijeme kod kojeg je za većinu zgrada potrebna renovacija ili rekonstrukcija. Više od 40 % zgrada starije je od 50 godina što bi značilo da je uporabni vijek tih građevina već istekao. U građevinskom sektoru u Republici Hrvatskoj otrprilike 40 % troškova se pripisuje rehabilitaciji, rekonstrukcijama i rušenju postojećih građevina. Glavna karakteristika građevina izgrađenih prije 1970-ih godina je korištenje tradicionalnih građevinskih tehnika i materijala poput ziđa i drveta. Zgrade su izvedene od pune opeke sa zidovima debljine od 30 do 60 cm osiguravajući formiranje statički zadovoljavajuće konstrukcije. Stropovi su uglavnom napravljeni u drvu. 1960-ih beton u kombinaciji s drvetom i čelikom postepeno zamjenjuje tradicionalne materijale, no većina stambenih građevina je dan danas napravljena u kombinaciji betona, ziđa i drveta.

Jedan od najvažnijih ciljeva programa HORIZON 2020 je stjecanje potrebnoga znanja i vještina svih zainteresiranih strana u procesu učinkovitog energetskog obnavljanja zgrada. Direktive koje dolaze od strane Europske unije opširno se bave energetskom obnovom postojećih konstrukcija, no konstrukcijski aspekt je donekle zanemaren i zapostavljen. Kako bi se ostvarili željeni ciljevi energetske obnove nacionalnog građevinskog fonda, potrebno je ulaganje velikih finansijskih sredstava. Procjena sveukupnih ulaganja u energetsku obnovu za period od 2014. do 2049. godine uključujući inicijalne troškove, održavanje te zamjenu istrošene opreme iznosi  $3 \times 10^9$  eura. Prije katastrofalnih potresa koji su pogodili Hrvatsku 2020. godine, poveći broj građevina u Republici Hrvatskoj je bio u procesu energetske obnove i energetskog poboljšanja, ali bez značajnije seizmičke provjere ili poboljšanja, tj. seizmičkog pojačanja konstrukcije.

Već je davno ustanovljeno da je ziđe jedan od najčešće korištenih materijala u graditeljstvu diljem cijelog svijeta radi svoje jednostavnosti i visokokvalitetnih karakteristika. Iako korištenje opeke i kamena u graditeljstvu ima svoja ograničenja, na temelju provedenih istraživanja omogućeno je korištenje upravo tih materijala u formiranju kompleksnih građevina s većom točnošću, ekonomičnošću i sigurnošću. Također bitno je napomenuti da je većina građevina od kulturne i povjesne važnosti u čitavoj Europi napravljena upravo u ziđu. Samo ta činjenica je dovoljno veliki motiv da se procjena stanja i rehabilitacija takvih građevina provodi na maksimalno visokoj razini. Uz to, mora se napomenuti da većina ljudi u urbanijim sredinama radi i živi u takvom tipu građevina stoga se mora formirati vrlo precizna strategija za sve zidane zgrade i građevine. Dok se opeka i kamen koriste za izradu zidova, stropovi i krovne konstrukcije se izvode u drvu. Većina stambenih objekata u Republici Hrvatskoj starijih od 50 godina je izgrađeno tako da su zidovi izvedeni od kamena ili opeke sa drvenim krovovima bez zadovoljavajućih spojnih elemenata između zidova i krovova [2]. Drvo je vrlo pristupačan prirodni resurs u čitavoj Europi te uz pravilno održavanje može imati veliku trajnost. Posljednjih nekoliko desetljeća tehnološkim napretkom i razvojem materijala na osnovi drva, posebice lameliranog drva, uspješno su sveladana ograničenja punog drveta kao građevnog materijala te je omogućena izgradnja inovativnih i kreativnih konstrukcijskih sustava.

Trenutačno stanje u području projektiranja i analizi pouzdanosti postojećih objekata okarakterizirano je zanemarivanjem prednosti naprednih metoda poput ažuriranja podataka (Upgrading) te se u potpunosti oslanja na pojednostavljene metode projektiranja novih konstrukcija. Takvo stanje rezultat je nedostatka adekvatnih i praktičnih metoda te naprednih tehnika za sve inženjere.

Izgradnjom građevina sve veće važnosti te globalnim ambicijama za održivim razvojem dolazi do sve strožih zahtjeva vezanih uz pouzdanost konstrukcije i korištenje održivih materijala. Na temelju toga za cilj se postavlja modifikacija i obnova postojećih građevina umjesto njihovog rušenja. Kontinuirano praćenje podataka, odnosno monitoring građevina (SHM) i procjena stanja starih i novih građevina najvažniji su čimbenici za njihovo održavanje. Nažalost, SHM i procjena stanja za zidane i drvene konstrukcije još uvijek nisu predstavljeni u strateškoj dokumentaciji na zadovoljavajući način.

Idući uvjeti su od velike važnosti kada se govori o procjeni stanja postojećih konstrukcija:

- Procjena stanja:** Građevinski inženjeri su odgovorni za izgrađenu okolinu. Izuzev projektiranja novih građevina, odgovorni su i za održavanje pouzdanosti postojećih građevina. Procjena stanja uključuje sve aktivnosti vezane uz potvrđivanje pouzdanosti postojećih konstrukcija za buduću uporabu
- Propadanje i oštećenja:** Pouzdanost i ponašanje konstrukcije, uslijed propadanja radi različitih utjecaja poput djelovanja iz okoliša, trošenja uslijed korištenja građevine ili radi nekvalitetnog održavanja i upravljanja, mogu biti uvelike narušeni.
- Pregled i ispitivanje:** Građevinski inženjeri trenutno stanje građevine određuje pomoću ispitivanja na licu mjesta. Prilikom detaljnog pregleda prikupljaju se informacije o građevini, nakon čega se provode i ispitivanja materijala u laboratorijima te se na temelju tih podataka određuje osnova za analizu konstrukcije i potvrdu njezine pouzdanosti.
- Ažuriranje (Updating):** Svi novi podaci vezani uz ponašanje konstrukcije, djelovanja na konstrukciju, uvjete okoliša ili svojstva materijala moraju se koristiti prilikom svake iduće analize konstrukcije kako bi se dobili pouzdani rezultati.
- Verifikacija:** Na temelju analize provedene na postojećim građevinama potrebna je odgovarajuća potvrda da je konstrukcijsko ponašanje i pouzdanost na zahtijevanoj razini.
- Popravak, obnova i pojačanje:** Analizom konstrukcije i prikupljenim podacima može se ustanoviti je li potrebna obnova konstrukcije kako bi se vratila neka konstrukcijska svojstva koja su narušena. Obnova građevine podrazumijeva sve aktivnosti koje se moraju provesti kako bi se postojeća građevina obnovila tj. popravila i/ili očuvala.
- Održavanje** bi trebalo biti dio rutine kako bi se osiguralo zadovoljavajuće konstruktivno ponašanje. Tijekom samog održavanja može se koristiti kontinuirani monitoring kako bi se moglo promatrati stanje konstrukcije, kao i djelovanja na samu konstrukciju tijekom duljeg vremenskog perioda.

Potreba za održavanjem izgrađene okoline podržana je globalnom politikom što se jasno vidi iz npr. Kyoto protokola iz 1997. i svih svjetskih kongresa vezanih uz klimatske promjene i njihovog učinka na izgrađenu okolinu i građevinu općenito. Dugoročni globalni

ciljevi vezani su uz održivi razvoj što podrazumijeva implementaciju renoviranja, održavanja i zamjene postojećih građevina. Bitno je razlikovati dvije vrste postojećih građevina i to u odnosu na njihovu vrijednost. Postoje novije postojeće građevine s većom ekonomskom tj. finansijskom vrijednošću te građevine kulturne baštine čija vrijednost je nematerijalne odnosno kulturne prirode te navedena činjenica vodi i do drugačijih postupaka prilikom procjene stanja.

Procjena stanja kod neke postojeće građevine provodi se kroz niz koraka gdje sama preciznost i kvaliteta procjene direktno ovise o kvaliteti dostupnih podataka i o važnosti same građevine. Broj potrebnih koraka tj. faza neke procjene ovisi o razini sumnje, izvedivosti pojedinih faza procjene te razini kompleksnosti obnove, pojačanja, uzimajući u obzir ekonomski tj. materijalni aspekt [3]. Trenutno postoje brojne metode za procjenu stanja kod drvenih i zidanih konstrukcija, no njihov opseg i učestalost, sustav odluka za procjenu sigurnosti te potrebne intervencije u slučaju nezadovoljavajuće pouzdanosti jednostavno nisu usuglašene. Postoji niz razloga za procjenu stanja neke postojeće konstrukcije. Najčešći razlozi su ukratko opisani u [3]. U nekim situacijama može se javiti sumnja u prepostavke proračuna te je zahtijevana ponovna procjena stanja kao u istaknutim situacijama kad dolazi do [4, 5]:

- Produljenja uporabnog vijeka
- Promjena u namjeni
- Zahtijevanog povećanja pouzdanosti
- Nedostatka održavanja i provjere stanja kroz dulji vremenski period
- Sumnje i nesigurnosti vezanih uz pouzdanost ili neispravnosti u ponašanju konstrukcije
- Izloženosti neočekivanom ili neviđenom ekstremnom djelovanju (potres, slučajna dje-lovanja, požar itd.)
- Negativnog iskustva dobivenog na sličnim prijašnjim projektima
- Dostupnosti novih spoznaja i revidiranih propisa i zakona
- Spoznaje o greškama u planiranju i izgradnji konstrukcije.

Posljednjih nekoliko godina sve teme vezane uz istraživanja i obnove postojećih građevina do bile su vrlo veliki interes javnosti te su napravljene razne studije vezane uz metode i tehnike mjerjenja i ispitivanja. Te metode uglavnom se fokusiraju na prepoznavanje, lociranje i procjenu oštećenja kao i na određivanje karakteristika materijala postojeće konstrukcije. U slučaju drveta i zida postoji nekoliko ne-razornih i polu-razornih metoda različite sofisticiranosti i namjene. Najvažnije metode procjene stanja drvenih konstrukcija navedene su [3, 6-9] kako slijedi:

- Vizualni pregled [10-12]
- Mjerjenje vlažnosti drva [13, 14]
- Mjerjenje otpora prodiranja igle [15]
- Otpornost na izvlačenje vijke
- Otpornost na bušenje i prodiranje igle [16, 17]
- Posmična ispitivanja uzorka [18, 19]
- Mjerjenja različitim vrstama valova
- "X-ray" mjerjenja [20, 21]
- Mjerjenja dinamičkih parametara [22]

- Opterećenje elemenata in-situ
- Termografija [23, 24]
- Mjerjenje pomaka i relativnih deformacija (Harmanci et al. 2016)
- Kombinacija metoda [25-27].

Najvažnije metode mjerjenja za zidane konstrukcije:

- Vizualni pregled [28]
- Mjerjenje tvrdoće zidnog elementa pomoću sklerometra [29, 30]
- Utvrđivanje položaja armature [31]
- Određivanje karakteristika zida metodom valova naprezanja [32]
- Ultrazvučna ispitivanja [33]
- Određivanje karakteristika zida mjerjenjem brzine prolaska zvučnih valova [34, 35]
- Ispitivanje strukture materijala elektromagnetskim valovima [34, 36]
- Infracrvena termografija [37]
- Endoskopska kamera [38]
- Mjerena plosnatom prešom (flat-jack) [39-42]
- Akustička emisija [43]
- Kombinacija metoda.

Kod procjene stanja drvenih konstrukcija parametri koji se uvijek mijere i provjeravaju, a krucijalni su za normalno ponašanje konstrukcije su: količina vlage drvenih elemenata koja ovisi o relativnoj vlažnosti i temperaturi okoline, modul elastičnosti i gustoća elemenata koji se mogu izmjeriti pomoću ultrazvučnih tehnologija i konačno kvaliteta i pravilnost poprečnog presjeka [8]. Parametri koji bi se morali provjeravati kod zidanih konstrukcija su: tip zidnog elementa, tip morta i njegova tlačna čvrstoća, tlačna čvrstoća betonske ispune (ako postoji), čvrstoća čeličnih šipki (ako postoji), tlačna, posmična i savojna čvrstoća zida, modul elastičnosti, spojevi između zida i stropova tj. podova. Ovakav široki spektar dostupnih metoda mjerjenja pokazatelj je velikog iskustva sakupljenog proteklih nekoliko desetljeća. Nažalost to iskustvo nije pomoglo razvoju kvalitete ispitivanja i ocjene pouzdanosti konstrukcije. Za sada se vrlo često, rezultati tih mjerjenja i ispitivanja ne mogu koristiti za određivanje čvrstoće i krutosti kada se govori o projektiranju i ocjenjivanju pouzdanosti konstrukcije sa zadovoljavajućom pouzdanosti.

## 2 Napredne metode

Postoji jasna razlika između projektiranja nove konstrukcije i projektiranja stanja postojeće konstrukcije. Prilikom projektiranja nove konstrukcije, jedine informacije s kojima se raspolaze su geometrijske i materijalne karakteristike elemenata i konstrukcije te propisi i opterećenja na temelju lokacije, oblika i namjene građevine. Na osnovu takvih općenitih informacija formuliraju se ili deterministički proračuni s uporabom parcijalnih faktora ili probabilistički proračuni. Tek po završetku građevine moguće je prikupiti niz informacija vezanih uz samu konstrukciju. Na temelju tih spoznaja znanje o konstrukciji se nadopunjuje i koristi za potvrđivanje pouzdanosti neke konstrukcije [4].

Osim materijalnih karakteristika, niz drugih podataka o konstrukciji moguće je nadopuniti kao što su recimo njezina geometrija, lokalni klimatski uvjeti, oštećenja, propadanja, rubni uvjeti, povijest opterećenja, statički i dinamički odgovor konstrukcije itd. Podaci o ponašanju konstrukcije mogu se dobiti na temelju povijesti djelovanja na konstrukcije. Dopuna i obnavljanje tih podataka provodi se s različitim stupnjevima preciznosti u ovisnosti o tipu mjerjenja ili informaciji.

Korištenjem dodatnih podataka o konstrukciji mogu se izraditi tzv. posterior probabilistički modeli, uporabom tzv. prior i posterior vrijednosti slučajnih varijabli [44]. Korištenjem dodatnih podataka o materijalnim karakteristikama mogu se koristiti Bayesove metode koje su popularne u nadogradnji numeričkih modela koji sadrže nepoznate parametre modela [45-48]. Osim materijalnih karakteristika, i sam proračun može biti nadograđen podacima, npr. uporabom rezultata sa sličnih konstrukcija, razlučivanjem posljedica djelovanja, itd.

Prilikom projektiranja drvenih konstrukcija jedan od najkompleksnijih izazova je uzimanje u obzir velike varijabilnosti drveta kao prirodnog materijala. Ziđe s druge strane je kompozitne građe te se sastoji od zidanih elemenata i morta. I elementi i mort mogu biti napravljeni od različitih materijala s različitim karakteristikama. Ponašanje ziđa ovisi o geometriji samih zidanih elemenata uključujući njihovu duljinu, širinu, visinu te smjer i oblik šupljina, a čvrstoća ovisi i o njezi samih elemenata. Specifikacija tlačne čvrstoće, koja je funkcija opeke i morta, često se zahtijeva. Određivanje varijabilnosti i nesigurnosti u modeliranju tlačne čvrstoće od velike je važnosti za ponašanje ziđa [49].

U odnosu na ostale industrijske proizvode poput betona i čelika, drvo kao materijal je puno nepouzdanosti. Kako bi se omogućilo projektiranje novih konstrukcija bez nepouzdanosti potrebna je ocjena materijala i klasifikacija drveta prema razredima čvrstoće. Što se tiče procjene stanja kod postojećih građevina, vrlo često su oni nepoznati. Ipak, pozitivno je da pouzdanost konstrukcije zapravo direktno ovisi o stvarnim karakteristikama određenih elemenata te se stoga metode procjene stanja moraju fokusirati na kvalitetno, precizno i točno određivanje stvarnih karakteristika elemenata kako bi se reducirala nepouzdanost u otpornost čitave konstrukcije. S druge strane prilikom projektiranja nove konstrukcije koriste se parcijalni faktori sigurnosti za čvrstoću materijala pomoću kojih se u obzir uzimaju nepouzdanosti karakteristika materijala koji se koriste za formiranje konstrukcije.

Jedna od samo nekoliko smjernica za procjenu stanja postojećih konstrukcija je ISO 13822 [50]. Upute za održavanje postojećih građevina postoje u raznim državama, no samo neke, poput Švicarske [51] ili Nizozemske [52], su objavile norme za procjenu i ocjenu postojećih konstrukcija. Zbog takvog stanja potrebno je spojiti i usuglasiti pristupe raznih država te stvoriti skup pravila za postojeće konstrukcije koji bi bio opće prihvaćen, dosljedan i usklađen te bi komplementirao pravila za projektiranje novih konstrukcija. Neka pravila i standardi ipak postoje poput SIA 462 [51] i SIA 469 SIA 469 [53]. Unutar HRN EN 1998-3 postoje prijedlozi za procjenu stanja zidanih konstrukcija no uglavnom su samo informativne prirode. Standard ISO 13822:2010 [50] sadrži općenite savjete za procjenu stanja neovisno o materijalu. Kao i prethodno navedeni EN 1998-3 [54] nedostaje mu sofisticiranih i detaljnih informacija. Iako niti jedan od ovih standarda nije pretjerano primjenjiv u praksi, smjernice za korištenje ASCE 41-17 [55, 56] sadrže

preporučenu opremu, postupke procjene stanja, broj potrebnih testova kao i zahtijevane proračune.

Postojeći postupci projektiranja u građevinarstvu temeljeni su na pojednostavljenim konceptima pouzdanosti koji omogućavaju inženjerima da na jednostavan način provedu verifikaciju konstrukcijske sigurnosti većine građevina. Deterministički pristup omogućava jednostavno ocjenjivanje stanja, no za manu ima prevelike faktore sigurnosti. Kako bi se osigurala ekonomski najpovoljnija rješenja kod procjene stanja postojećih građevina potrebne su naprednije metode poput polu-probabiliističkog pristupa, probabiliističkog pristupa ili pristupa baziranog na riziku koji nisu uspostavljeni kod drvenih i zidanih konstrukcija.

Napredne metode za procjenu i probabiliističku ocjenu stanja postojećih građevina temeljene su na ažuriranim (updated) informacijama i uspješno se koriste u drugim područjima [57], no znatno slabije u području drvenih konstrukcija [58-60] i zidanih konstrukcija [30, 61-65]. Razlikujemo tzv. pre-posterior analize odlučivanja (s nepoznatom informacijom), tzv. prior analize (s poznatom informacijom) i tzv. posterior analize (s dodatnom informacijom). Bayes-ove metode nadogradnje informacija omogućavaju uporabu dodatnih informacija u posterior analizama odlučivanja. Uporabom Bayes-ovog teorema (BDT) uvode se probabiliistički okviri za kvantifikaciju koristi i procesa odlučivanja. Pomoću BDT-a vrlo je jednostavno postaviti "stablo odluke" koje predstavlja model odluka i mogućih posljedica tih odluka uključujući i pripadajuće mogućnosti i troškove. Analiza vrijednosti informacija (Vol) je pojam koji predstavlja tzv. pre-posterior analizu odlučivanja kvantificirajući povećanje u koristi u procesu odlučivanja kao razliku između tzv. prior i posterior analiza s tzv. pre-posterior analizom [66]. U kontekstu Vol, informacija predstavlja bilo koju vrijednost parametara slučajnih varijabli dobivenih eksperimentom, analitičkim, numeričkim ili empirijskim metodama povezanih sa scenarijima odlučivanja [67].

Zajedno s procjenom konstrukcijskog rizika te proučavanjem i razvojem pouzdanosti konstrukcija, monitoring (SHM) je postao vrlo važnim dijelom infrastrukturnog inženjerstva. Cilj je povećati korist monitoringa s implementiranjem analiza odlučivanja u procjeni vrijednosti samog monitoring – prije nego što je on sam implementiran. Poznavajući vrijednost monitoringa, odlučivanje i upravljanje može biti unaprijeđeno što će utjecati na efikasne, pouzdane i sigurne strategije održavanja konstrukcija [27].

Sve prethodno navedene metode mogu biti vrlo korisne za bolje razumijevanje ponašanja konstrukcije, za procjene rizika i troškova te očuvanje postojećih konstrukcija.

Prilikom projektiranja postojeće građevine najveći zahtjev i izazov je zadovoljavanje principa proporcionalnosti. Naime, kako bi se karakteristike materijala učinkovito iskoristile te kako ne bi došlo do nepotrebnih intervencija, provode se samo one modifikacije koje su važne za sigurnost, pouzdanost i buduću upotrebu građevine. Čitava procjena je temeljena na postupcima projektiranja novih građevina i na planiranju intervencija. Također, NDT metode ne omogućavaju kvantifikaciju pouzdanosti neke konstrukcijske komponente [3].

Pouzdana procjena stanja konstrukcija služi izbjegavanju otkazivanja konstrukcije i osigurava bolju iskoristivost materijala koji se u njoj koriste. Nedostatak standardiziranih metoda procjene dovode do nezadovoljavajuće rehabilitacije zidanih i drvenih konstruk-

cija, no svaka metoda pomaže u rastu kolektivnog znanja i iskustva o njihovom ponašanju. Upravo ta znanja predstavljaju osnovu za poboljšanje projektiranja, proizvodnje, izgradnje i održavanja svih građevina.

Kao što je već napomenuto, norme koje su razvijene vezane su uz projektiranje novih konstrukcija te nisu u potpunosti primjenjive za postojeće konstrukcije zbog velike različitosti između projektiranja i faze procjene stanja. Sve sumnje prilikom projektiranja proizlaze iz ograničenosti u određivanju opterećenja i otpornosti konstrukcije na ista. Do ograničenosti dolazi radi varijabilnosti materijala i specifičnih djelovanja te radi različitosti u inženjerskim praksama. Bitno je napomenuti da konzervativni pristup prilikom projektiranja neće dovesti do prevelikog povećanja troškova dok konzervativan pristup prilikom procjene stanja može dovesti do nepotrebnih i vrlo skupih popravaka i zamjena elemenata [57].

Procjena i ocjena stanja neke konstrukcije krucijalna je faza za točnu procjenu, verifikaciju i održavanje svih postojećih građevina [26]. Sve nove metode i postupci moraju se integrirati u sva buduća znanstvena istraživanja kao i u samu praksu. U slučaju da se shvati važnost procjene stanja i monitoringa, projektiranje, izgradnja i održavanje životnog vijeka građevine može se drastično poboljšati. Glavni izazovi za buduća istraživanja i razvoj područja procjene stanja postojećih građevina su sljedeći:

- Učinkovito određivanje karakteristika konstrukcije
- Precizna procjena karakteristika materijala
- Pouzdano predviđanje ponašanja konstrukcije
- Vođenje računa o nadogradnji informacijama za postupak procjene stanja
- Optimizacija postupaka projektiranja i dokazivanja
- Kvantifikacija utjecaja povijesti djelovanja i trajanja djelovanja na nosivost konstrukcije za ostatak njezinog životnog vijeka
- Razvitak ne-invazivnih mjera za intervenciju i obnovu konstrukcije
- Poboljšanje komunikacije s donositeljima odluke.

Rješavanje navedenih problema može biti od velike koristi i pomoći svim inženjerima, stručnjacima, znanstvenicima i studentima koji se bave procjenama stanja postojećih zidanih i drvenih konstrukcija.

## 3 ARES projekt

### 3.1 Povezanost projektnog prijedloga s trenutnim stanjem u području istraživanja

Europska strategija, istraživanje i razvoj u području očuvanja postojećih građevina usmjerena je k pametnom i održivom razvoju što je objedinjeno u programu Europe2020. Hrvatski građevinski sektor identificiran je kao sektor s izvrsnim ljudskim resursima koji mogu proizvesti nove i bitne vještine. Prema strategiji pametne specijalizacije 2016-2020 to će biti postignuto implementacijom Hrvatskog kvalifikacijskog okvira gdje se kao ciljevi ističu napredna rješenja za bolje ponašanje i održavanje konstrukcija, po-praćene s energetskom učinkovitosti.

Niz tehničkih dokumenata izdano je od strane domaćih i međunarodnih tijela s fokusom na sustavne i znanstvene metode koje se mogu koristiti za određivanje preostale nosivosti, trajnosti i pouzdanosti materijala i sustava u postojećim konstrukcijama. Ipak, kada govorimo o drvenim i zidanim konstrukcijama te je dokumente potrebno pregledati, proširiti i poboljšati s novim znanjem u području materijalnih znanosti, tehnoloških napredaka u području procjene stanja konstrukcija i monitoringa te ih nadopuniti pomoći podataka dobivenih iz praktičnih iskustava vezanih uz profesionalni rad na postojećim građevinama.

Projekt "Procjena stanja i obnova postojećih građevina - Razvoj suvremenih metoda za zidane i drvene konstrukcije" (eng. *Assessment and Rehabilitation of Existing Structures – development of contemporary methods for masonry and timber structures*) je uspostavljeni istraživački projekt financiran od Hrvatske zaklade za znanost. Ukupna vrijednost projekta iznosi 1.4 milijuna kuna plus financiranje plaće dva doktoranda na period od četiri godine. Projekt je dobiven na natječaju 2019. godine te započeo 9.1.2020. godine (2 mjeseca prije zagrebačkog potresa).

Tema projekta od velike je važnosti za očuvanje postojećih građevina, obnavljanje građevina kulturne baštine i razvoj smjernica i normi. Rezultati koji će se dobiti ne-razornim ispitivanjima i probabilističkom analizom bit će od velike važnosti za stvaranje novih normi i smjernica na europskoj razini. Građevinarstvo kao struka uvelike podupire sva istraživanja vezana uz postojeće građevine čiji životni i uporabni vijek je pri samom kraju ili je već prekoračen.

### **3.2 Metodologija (osnovna ideja)**

Prva faza projekta biti će prikupljanje suvremene dokumentacije i podataka o građevinskom fondu u Republici Hrvatskoj. Pratit će se niz različitih konstrukcija s različitim konstrukcijskim sustavima, stanjem u kojem se nalaze, namjenom, vrijednošću i važnošću građevine. Prvi korak u procjeni stanja i analizi konstrukcija bit će vizualni pregled, nakon kojega slijedi određivanje pozicije konstrukcijskih elemenata i geometrijskih karakteristika. Potom će se odrediti stanje u kojem se nalaze elementi kao i karakteristike materijala, a uzet će se u obzir i svi podaci vezani uz promjene konstrukcije iz originalnog projekta. Uz sve to promatrati će se i stanje detalja, prethodno ponašanje konstrukcije i uvjeti opterećenja za sve promatrane konstrukcije. Nakon toga provoditi će se ne-destruktivna (NDT) ispitivanja elemenata i sustava s ciljem procjene mehaničkih karakteristika materijala te ocjene stanja konstrukcije i kvalitete korištenog materijala. Terenska ispitivanja i procjena stanja provoditi će se u nekoliko grupa, prema slici 1.

Prvotna ideja projekta bila je istražiti i pregledati 20 studija slučajeva, 10 zidanih i 10 drvenih konstrukcija te na osnovu dobivenih rezultata formirati bazu podataka za važne karakteristike materijala. Kako su nedavni potresi poprilično oštetili veći broj građevina te se izrađuju elaborati i projekti obnove zidanih konstrukcija, taj broj će biti i poprilično veći. Na oko 30 objekata, projektni tim će izraditi cijelokupna eksperimentalna istraživanja i modeliranja, a kao krajnji cilj bit će prikupljanje podataka od inženjera koji su provedli projekte obnove postojećih zidanih konstrukcija. Također, projekt je prvotno zamislen kao 50 % istraživanje drvenih konstrukcija i 50 % istraživanja u zidanim konstrukcijama,

zbog novonastalih okolnosti logičan izbor je bio preusmjeriti istraživanje na primarno zidane konstrukcije. Naravno, u postojećim zidanima, provjeravat će se i karakteristike drvenih elemenata.

Mehaničke karakteristike koje će se promatrati su tlačna i posmična čvrstoća definirane preko koeficijenta adhezije i trenja za zid, modul elastičnosti zida, vlačna i ili čvrstoća na savijanje i modul elastičnosti drveta. Karakteristike koje se dobivaju NDT metodama su vlastita frekvencija, brzina ultrazvučnog vala, vizualna ocjena itd. Dobiveni podaci koristit će se za analizu pouzdanosti i statističku analizu.

Po završetku pregleda stanja u kojem se konstrukcija nalazi, prelazi se na statičku analizu s ciljem određivanja konstrukcijskog ponašanja. To uključuje i određivanje unutarnjih sila u elementima, određivanje ponašanja konstrukcije s obzirom na odnos djelovanja i deformacije te kontrolu globalne stabilnosti. Numerički modeli će se raditi u programskim paketima 3Muri (nelinearne metode – metoda postupnog guranja) te SCIA Engineer i RFEM Dlubal (linearne metode – spektralna modalna analiza). Cilj projekta je modelirati, analizirati i predvidjeti ponašanje postojećih građevina sofisticiranim metodama.

Na temelju baze podataka probabilističkih svojstava materijala, formirat će se modeli za predviđanje karakteristika materijala. Ovi modeli omogućit će određivanje važnih karakteristika materijala pomoći izmјerenih parametara dobivenih iz vizualnih pregleda, NDT-a, laboratorijskih ispitivanja itd. Analizom osjetljivosti najvažnijih karakteristika definirat će se osnovni postupak za predviđanje i ocjenu karakteristika materijala.

Nakon podrobnih ispitivanja i analize odabranih postojećih konstrukcija, stvarne karakteristike materijala će se eksperimentalno ispitati.

Nakon toga, mehaničke će se karakteristike modelirati kao slučajne varijable i drugačije prior i posterior informacije će biti korištene. Pouzdanost i zadovoljavajući zahtjevi proračuna dobit će se determinističkim, semi-probabiliističkim i probabiliističkim metodama. Dobiveni podaci dat će usporedbu ponašanja konstrukcija prema normama za nove i postojeće konstrukcije. Trenutno stanje konstrukcije, kao i njezino buduće ponašanje te pouzdanost konstrukcije bit će analizirani za različite vrste djelovanja na temelju modela akumulacije oštećenja. Baza podataka za načine otkaživanja konstrukcija bit će ocijenjena na temelju tipičnih načina otkaživanja. Cilj je stvaranje svih potrebnih modela i alata za predviđanje pouzdanosti postojećih konstrukcija baziranih na ažuriranim podacima i to za različite buduće scenarije.

Za potrebe pregleda i ispitivanja ocijenit će se i ne-razorne i polu-razorne metode. Dokumenti za metode procjene i obnove stanja bit će formirani te će se pripremiti i u detalje objasniti potpuni plan održavanja i rukovođenja postojećim građevinama s ciljem njihovog očuvanja. Osnovna ideja je poboljšati sustav za donošenje odluka u projektiranju, izvođenju i održavanju građevina te omogućiti jeftinije, pouzdanije i sigurnije strategije za održavanje. U ovisnosti o dostupnim informacijama, razredu važnosti i zahtijevanoj razini pouzdanosti, bit će predloženi različiti postupci za procjenu pouzdanosti postojećih konstrukcija u obliku smjernica za inženjere u procesu procjene stanja. Cilj je omogućiti inženjeru uvid u mogućnosti naprednih metoda i tehnika unutar procesa procjene stanja.

### 3.3 Ciljevi (osnovna ideja)

Procjena stanja se temelji na proračunskim postupcima za nove građevine pa se često tijekom planiranja i pregleda preporuča pojačanje konstrukcije. Trenutna praksa procjene postojećih konstrukcija nije prikladna za donošenje kvalitetnih odluka o pouzdanosti konstrukcija. Usprkos tome što je uloga dopunjениh podataka na temelju pregleda presudna u određivanju pouzdanosti postojećih konstrukcija, trenutno stanje znanja područja dimenzioniranja i procjene pouzdanosti postojećih konstrukcija zanemaruje te prednosti te se primarno fokusira na jednostavne postupke proračuna novih konstrukcija. Cilj ovog projekta je stoga proučiti ulogu procjene stanja na pouzdanost postojećih konstrukcija. Projekt je orientiran na postojeće zidane i drvene građevine, tj. na ocjenu korisnosti procjene stanja s pogleda ekonomičnosti i sigurnosti konstrukcija.

**Tablica 1. Ciljevi i očekivani rezultati projekta ARES**

| Cilj   | Rezultat   |
|--|--|
| Razvoj precizne baze podataka građevina i metoda procjene stanja   | ...kako bi se dobio uvid u hrvatski građevinski fond   |
| Uvid u materijalne i konstrukcijske karakteristike prikupljene procjenom stanja i analizama  | ...za potrebe modeliranja, analize i predviđanja ponašanja postojećih odabranih građevina te priprema podataka za analizu pouzdanosti                      |
| Pripremiti bazu podataka dobivenih procjenama stanja za analizu pouzdanosti  | ...za određivanje najvažnijih karakteristika materijala za razvoj normi u budućnosti   |
| Pouzdana kvantifikacija svojstva materijala i ponašanja materijala u ovisnosti o vremenu za strukturalnu analizu postojećih konstrukcija | ...za nadopunu znanja i dobivanje uvida u metode pouzdanosti od strane inženjere iz struke   |
| Optimalizacija modela za predviđanje ponašanja konstrukcije  | ...kako bi se razvili svi potrebni modeli i alati za predviđanje pouzdanosti postojećih građevina temeljeni na različitim količinama prikupljenih podataka |
| Ocjena proporcionalnosti i razvoj smjernica za projektiranje   | ...kako bi se razvile odgovarajuće metode za odgovorne osobe u postupku procjene stanja  |
| Ocjena pouzdanosti i razvoj smjernica za projektiranje   | ...kako bi se omogućilo inženjeru da iskoristi napredne metode i tehnike u postupku procjene stanja  |

Projektom će se osigurati mogućnost daljnog razvoja naprednih postupaka procjene stanja, metoda nadogradnje modela (Updating) ponašanja materijala i proračunskih parametara, razvoja pojednostavljenih metoda proračuna i modelske podloge za procjenu ponašanja i pouzdanosti postojećih konstrukcija, uzimajući u obzir dopunjena znanja svojstava materijala i konstrukcije te njihove varijabilnosti. Posebna pozornost će se posvetiti razvoju smjernica za projektiranje kako bi se osiguralo ekonomično i pouzdano ponašanje usprkos značajnim nepouzdanostima mehaničkih svojstava i ponašanja postojećih zidanih i drvenih konstrukcija.

### **3.4 Projektni moduli**

Projekt se sastoji od nekoliko modula koji su vrlo sažeto opisani u sljedećim točkama.

#### **3.4.1 Projektni modul 1: Razvoj precizne baze podataka konstrukcija i metoda procjene stanja**

Pripremit će se baze podataka postojećih konstrukcija za zidane i drvene konstrukcije. Posebno će se kategorizirati građevine kulturne baštine. Posebna pažnja će se posvetiti tipičnim i najčešćim vrstama i sustavima konstrukcija. Preliminarno istraživanje pomoći osnovnih analiza i odabranih studija slučajeva će se koristiti za pripremu terenskih ispitivanja i za odabir metoda procjene stanja za svaku studiju slučaja. Osnovni dio procjene stanja bit će određivanje svojstava materijala i stanja konstrukcije pomoći NDT metoda. Analizirat će se osnovna razlika između degradacije materijala i mehaničkog oštećenja te će se procijeniti mogući oblici otkazivanja konstrukcije.

Cilj navedenih aktivnosti je odrediti materijalne i konstrukcijske karakteristike dobivene procjenom stanja. Terenska ispitivanja i prikupljanje podatak iz procjene trajat će do kraja projekta.

Na temelju procjene stanja formirat će se probabilistička baza podatka. Provest će se iduće aktivnosti: Prikupljanje podataka o svojstvima materijala iz NDT mjerena za potrebe dobivanja probabilističkih podataka o važnim materijalnim karakteristikama te opisivanje konstrukcijskog ponašanja postojećih građevina; korelacija između karakteristika materijala.

#### **3.4.2 Projektni modul 2: Razvoj modela, analiza i studija osjetljivosti**

Po završetku prikupljanja svih podataka o stanju svake konstrukcije, provest će se detaljni numerički modeli, nakon čega će se formirati 3D vizualizacije za svaku konstrukciju. Na temelju prethodnih rezultata, napravit će se analiza osjetljivosti za najvažnije karakteristike te će se definirati osnovni postupak za predviđanje i ocjenu karakteristika materijala. Nakon analize osjetljivosti slijedi stvaranje modela za opisivanje stanja opterećenja i modela za procjenu trajanja učinaka od djelovanja i akumulaciju oštećenja. Pomoći svih navedenih aktivnosti, mehaničke karakteristike i učinci djelovanja će se koristiti za ocjenu ponašanja konstrukcije i povezivanje s probabilističkim svojstvima. Testiranja robusnosti modela bit će popraćena regresijskim analizama. U konačnici, s više dostupnih podataka, provest će se verifikacija prvotnih zaključaka

#### **3.4.3 Projektni modul 3: Verifikacija i optimizacija modela**

Priprema opreme za ispitivanja i sama ispitivanja provest će se od strane inženjera na Građevinskom fakultetu u Zagrebu. Fokus istraživanja bit će na on-site istraživanja, ali dio ispitivanja (npr. tlačna čvrstoća opeke) odradit će se i u laboratorijskim uvjetima.

Za bolje razumijevanje ponašanja konstrukcije potrebno je provesti ocjenu stanja konstrukcije na temelju prikupljenih podataka i predvidjeti ponašanje na temelju probabi-

lističkog opisa materijalnih karakteristika. Kako bi se dobio uvid u probleme trenutnih regulativa i normi, potrebno je provesti komparativnu analizu između projektiranja postojećih i novih konstrukcija prema trenutnim normama. Ideja je prikazati nedostatke građevinske regulative i normi na jasnim i stvarnim postojećim konstrukcijama koje će se analizirati tijekom projekta. Ocena konstrukcija s obzirom na najčešće oblike oštećenja i otkazivanja i ocena s obzirom na utjecaje iz okoliša na konstrukciju omogućiće bolje predviđanje ponašanja konstrukcije i optimalizaciju svih modela. Izraditi će se Value of Information (Vol) analiza za nekoliko tipičnih građevina (studija slučaja).

#### **3.4.4 Projektni modul 4: Ocjena pouzdanosti, proporcionalnosti i razvitak smjernica**

Konačni rezultati projekta bit će ocjena analize kvalitete donošenja odluke u postupku procjene stanja i ocjena suvremenih metoda procjene stanja i ocjena odgovarajućih, ne-invazivnih metoda održavanja konstrukcija. Različiti postupci projektiranja, deterministički, probabilistički i temeljeni na riziku koristiti će se za implementaciju prikupljenih podataka u procesu projektiranja i obnavljanja građevina. Za ocjenu pouzdanosti, potrebno je formirati platformu za koordinaciju trenutnog istraživanja i prikupljenih podataka. Poboljšanje prijedloga i uputa kako bi postupak procjene postao shvatljiviji, vjerodostojniji i uvjerljiviji za projektante i odgovorne osobe ostvariti će se preko 3D modela promatranih konstrukcija s potpunim podacima o procjeni stanja, konstrukcijskom i kontinuiranom pregledu i analizama pouzdanosti. Razvitak smjernica za projektiranje osnovni je cilj ovog projektnog modula s idejom da se nove i metode nadogradnje (Updating) uključe u proces procjene. U razvitu smjernica razmatrat će se idući aspekti: područje primjene (uključujući razliku između procjene stanja već postojećih dijelova konstrukcije i projektiranja novih dijelova konstrukcije ili ojačanja elemenata), osnovna načela procjene stanja, metode nadogradnje informacija (Updating), metoda i format verifikacije, kriterij prihvaćanja određenog rizika te upute za donošenje odluke i planiranje intervencija.

Rezultati projekta će biti predstavljeni i na jednoj trening školi koja će biti otvorena za domaću međunarodnu publiku. Uz to, trodnevna trening škola će biti organizirana na Građevinskom fakultetu te će vodeći stručnjaci iz različitih područja biti pozvani da održe predavanje (4 vrhunska internacionalna stručnjaka). U zadnjoj godini bit će organizirana i završna konferencija na Građevinskom fakultetu te će biti pozvani ljudi iz znanstvenih i stručnih krugova. Očekivani broj sudionika je 60. Na kraju bitno je napomenuti da će rezultati biti prezentirani i podijeljeni s kolegama iz građevinske struke i arhitekture u Hrvatskoj.

## 4 Trenutačne aktivnosti i rezultati projekta

### 4.1 Potresi u Hrvatskoj u 2020. godini i ARES projekt

Republiku Hrvatsku su 2020. pogodila dva razorna potresa te oštetila popriličan građevinski fond na području nekoliko županija i Grada Zagreba. Kako je inicijalni projekt bio direktno usmjeren na proučavanje zidanih i drvenih konstrukcija, mogućnosti provedbe projektnih aktivnosti su se uvelike povećale. Tema koja je predložena i financirana prije samog potresa je apsolutno u skladu sa svim aktivnostima koja se trenutno događaju u post-potresnoj procjeni stanja i obnovi potresom oštećenih građevina. Kako je potres oštetio velik broj zidanih konstrukcija, tako je i odlučeno da se projektne aktivnosti usmjere više na zidane konstrukcije. Promjena je logična i opravdana s aspekta dobivanja većeg broja podataka za analizu. U sljedećim podnaslovima ukratko će biti predstavljeni trenutni rezultati projekta s osnovnim ciljevima i aktivnostima planiranim za daljnji napredak projekta.

### 4.2 Dosadašnji rezultati

#### 4.2.1 Znanstveni članak *Klasifikacija oštećenja stambenih zgrada u povijesnoj jezgri nakon potresa ML5.5 u Zagrebu, Hrvatska 2020.* [68]

2020. godine objavljen je članak u znanstvenom časopisu *International Journal of Disaster Risk Reduction* (Q1 časopis) koji se bavi utjecajem potresa na zaštićenu jezgru grada Zagreba nakon potresa u ožujku 2020. Ukratko se opisuju podaci o zagrebačkom potresu, tipologija zgrada u gradu te prikupljanje podataka nakon samog potresa. Rad se bavi brzom post-potresnom procjenom, klasifikacijom oštećenja i obrascima sloma/otkazivanja stambenih zgrada u staroj gradskoj jezgri Zagreba, gdje prevladavaju zidane konstrukcije. Nadalje, analizirani su i raspravljeni podaci prikupljeni u brzoj post-potresnoj procjeni. Detaljni grafički prikazi oštećenja popraćeni su fotografijama. Rad je izvrsno prihvaćen od strane istraživača u području potresnom inženjerstva te je do sada citiran već 42 puta.



Slika 1. Klasifikacija oštećenja stambenih zgrada u povijesnoj jezgri nakon potresa ML5.5 u Zagrebu

#### 4.2.2 Znanstveni članak *Metode za procjenu kritičnih svojstava u postojećim zidanim konstrukcijama pod seizmičkim opterećenjima — Projekt ARES* [69]

U znanstvenom časopisu *Applied Sciences* 2020. godine objavljen je članak koji se bavi određivanjem mehaničkih karakteristika ziđa putem eksperimentalnih on-site metoda. U ovom preglednom radu dan je uvid u projekt ARES, uključujući najnovije stanje stvarnog fonda zgrada i dajući dokaze o velikim poteškoćama u vezi s procjenom postojećih građevina. Uspoređuju se najčešće korištene tehnike i alati, s fokusom na njihove osnovne značajke i područje primjene. Sve poznate metode su nabrojane i ukratko objašnjene te su im pridruženi relevantni znanstveni članci. Dan je i kratki osvrt na postojeće probleme energetske obnove postojećih građevina bez konstrukcijskog pojačanja.



Slika 2. Metode za procjenu kritičnih svojstava u postojećim zidanim konstrukcijama pod seizmičkim opterećenjima — Projekt ARES

#### 4.2.3 Znanstveni članak *Pregled novih tehnologija za procjenu sigurnosti i seizmičke ranjivosti i otkrivanje oštećenja postojećih zidanih konstrukcija* [70]

U znanstvenom časopisu *Applied Sciences* 2020. godine objavljen je članak na temu novih tehnologija i procjene stanja zidanih konstrukcija. Građevinski sektor se pokazao kao jedan od najsporijih sektora koji prihvata tehnologiju, ali primjena tehnologije u određenim aspektima seizmičkog inženjerstva: od procjene seizmičkog rizika do otkrivanja oštećenja, kao i procjene stanja postojećih konstrukcija prije ili nakon potresa polako ulazi u metode koje će se sve više koristiti. U ovom radu dan je pregled literature o metodama procjene i tehnologijama otkrivanja oštećenja za postojeće (uglavnom) zidane

konstrukcije. Ukratko se objašnjavaju tradicionalne metode, a kritički se govori o modernim. Poseban fokus stavljen je na bespilotne letjelice, kao i na fotogrametriju i daljinsko detektiranje na kao tehnologiju koja može nadopuniti tradicionalne načine procjene i dati nam podatke o konstrukciji koje je često teško drugačije dobiti. Prikazana je grafička interpretacija jedne studije slučaja nakon potresa. Prikazani su otvoreni izazovi i mogućnosti novih tehnologija za bržu i lakšu procjenu seizmičke sigurnosti i ranjivosti.



Slika 3. Pregled novih tehnologija za procjenu sigurnosti i seizmičke ranjivosti i otkrivanje oštećenja postojećih zidanih konstrukcija

#### 4.2.4 Znanstveni članak *Procjena štete nakon potresa – studija slučaja obrazovne zgrade nakon zagrebačkog potresa* [71]

U znanstvenom časopisu *Sustainability* 2020. godine objavljen je članak u kojem je prikazana jedna studija slučaja – od procjene stanja do modeliranja. U ovom radu daje se cijelovita procjena obrazovne zgrade u zagrebačkom Donjem gradu. Planiran je i izveden opsežan program vizualnih pregleda i geometrijskih snimanja. Dodatno, prikazan je in-situ test posmične čvrstoće. Nakon opsežnog rada na terenu, prikupljeni podaci i rezultati uneseni su u programski paket 3Muri za konstrukcijsko modeliranje. Provedena je nelinearna statička (pushover) analiza kako bi se individualizirali mogući mehanizmi oštećenja i usporedila stvarna potresom nastala šteta u stvarnom s rezultatima softvera.

Article

**Post-Earthquake Damage Assessment—Case Study of the Educational Building after the Zagreb Earthquake**

Luka Lulić, Karlo Ožić, Tomislav Kišiček, Ivan Hafner and Mislav Stepinac \*



Slika 4. Procjena štete nakon potresa – studija slučaja obrazovne zgrade nakon zagrebačkog potresa

#### 4.2.5 Znanstveni članak *Pojačanje ziđa na posmik pomoću FRP-a ili TRM-a* [72]

U znanstvenom časopisu *Gradjevinar* 2020. godine objavljen je članak u kojem su opisane metode pojačanja ziđa na posmik. Fokus je stavljen na novije materijali i sustave kao što su polimeri armirani vlaknima (FRP) i tekstilom armirani mortovi (TRM). Potres koji se dogodio u Zagrebu i okolini 22. ožujka 2020. pokazao je osjetljivost nearmiranih zidanih zgrada na horizontalna djelovanja, potrebu za sanacijom oštećenja na nosivom i nenosivom ziđu i pojačanjem ziđa na posmik. Postojeći propisi ne pokrivaju proračune pojačanja s takvim sustavima. U radu su prikazani suvremeni postupci pojačanja ziđa FRP-om ili TRM-om, znanstvena istraživanja iz tog područja, prednosti i nedostaci te proračun takvih pojačanja.



Slika 5. Pojačanje ziđa na posmik pomoću FRP-a ili TRM-a

#### 4.2.6 Znanstveni članak *Procjena i sanacija kulturno zaštićene vojarne Kneza Rudolfa u Zagrebu nakon snažnog potresa* [73]

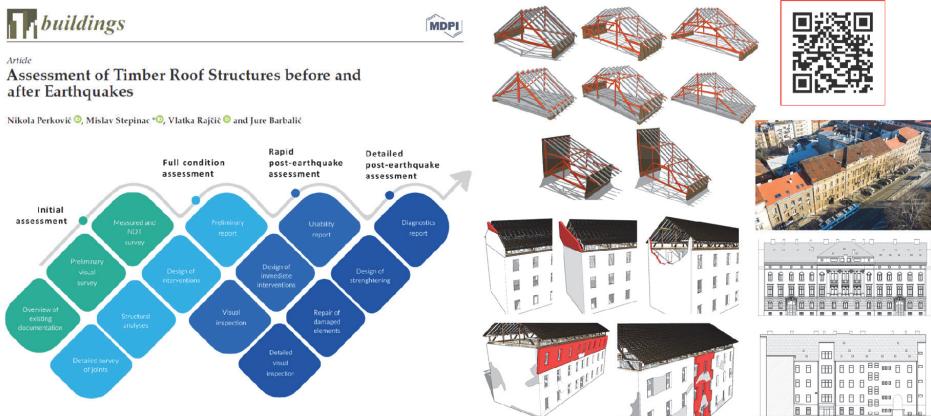
U znanstvenom časopisu *Buildings* 2021. godine, u suradnji s PASE Hrvatska i A&A Architects, objavljen je članak u kojem je prikazana postupak procjene stanja i pojačanja kulturno zaštićene građevine. Prikazana je detaljna povijesna pozadina zgrade studije slučaja, prikazana oštećenja nakon potresa te on-site ispitivanja mehaničkih karakteristika. Također, prikazani su i oblaci točaka fasade dobiveni jednostavnim laserskim skeniranjem. Opsežno je razrađena nelinearna statička seizmička analiza postupnim guranjem koja se izvodi u softveru 3Muri. Ukratko su prikazane četiri različite razine obnove prema novom hrvatskom zakonu. Dodatno, predlaže se nekoliko scenarija pojačanja s različitim tehnikama ojačanja.



Slika 6. Procjena i sanacija kulturno zaštićene vojarne Kneza Rudolfa u Zagrebu nakon snažnog potresa

#### 4.2.7 Znanstveni članak *Procjena drvenih krovnih konstrukcija prije i poslije potresa* [74]

U znanstvenom časopisu *Buildings* 2021. godine objavljen je članak u kojem je prikazana postupak procjene stanja drvenih konstrukcija unutar zidane građevine. U slučaju izvanrednih događaja, poput potresa, pitanje stanja drvene konstrukcije bitno je za stanje cijele zgrade. U radu su objašnjene nedestruktivne i poludestruktivne metode koje se često koriste za drvene konstrukcije. Sustavni pregled kriterija koji se koriste u ocjeni nosivih drvenih konstrukcija u seizmički aktivnom području bio je glavni cilj ovog rada, kao i ilustracija nedestruktivnih i poludestruktivnih metoda ispitivanja kroz studiju slučaja koja uključuje krovnu konstrukciju sto godina stare zgrade u Zagrebu. Obavljen je pregled prije i poslije potresa. Prezentirani su rezultati i identifikacija tipičnih oštećenja nakon potresa.



Slika 7. Procjena drvenih krovnih konstrukcija prije i poslije potresa

#### 4.2.8 Znanstveni članak *Posljie potresna procjena kulturno zaštićene zidane zgrade nakon zagrebačkog potresa—studija slučaja [75]*

U znanstvenom časopisu *Buildings* 2022. godine objavljen je članak u kojem je prikazana postupak procjene stanja postojećeg zidane zgrade "L" tlocrta u urbanoj jezgri Zagreba. Brza procjena stanja nakon potresa započela je isti dan nakon prvog potresa. Studija slučaja je jedna od najstarijih hrvatskih kulturnih institucija - Matica hrvatska. Riječ je o građevini velikog povijesnog značaja i kulturne vrijednosti, kao i veći dio gradske jezgre. Sukladno tome, ova zgrada je izgrađena bez obzira na seizmička djelovanja i uz korištenje tradicionalnih materijala i tehnika gradnje. U okviru ovog rada prikazane su hitne radnje koje su poduzete s problemima i izazovima koji su se pojavili. Nadalje, razrađen je proces donošenja odluka nakon potresa. Dodatno, numerički model razvijen je u 3Muri softveru. Provedena je nelinearna statička analiza postupnog guranja i ispitani su mogući mehanizmi otkazivanja. Specifičnost ove zgrade je njen tlocrt, tj. oblik "L" koji se vrlo često ne može modelirati N2 metodom zbog pojave torzije. U radi su prikazana ograničenja metode.



Slika 8. Poslije potresne procjena kulturno zaštićene zidane zgrade nakon zagrebačkog potresa—studija slučaja

#### 4.2.9 Znanstveni članak *Procjena stanja i strategija seizmičkog pojačanja AB konstrukcija – studija slučaja javne ustanove u Hrvatskoj* [76]

U znanstvenom časopisu *Buildings* 2022. godine objavljen je članak u kojem je prikazana postupak procjene stanja postojeće AB zgrade te dane varijantna rješenja obnove. Primijenjene su nove tehnologije (lasersko skeniranje, proširena stvarnost, penetrirajući radar) i praćene numeričkim modeliranjem i provjerama. Izrađeni se prijedlozi pojačanja koji uvažavaju potrebe vlasnika i potrebe za energetskom adaptacijom postojeće AB zgrade. Kako se u obnovi postojećih zgrada treba poštivati integrirani pristup, ova studija slučaja može predstavljati primjer dobre prakse u procesu seizmičke i energetske rekonstrukcije. Članak je rezultat dva znanstvena projekta; ARES-a te PDP-nZEB (Establishment of the national training centre for nearly Zero Energy Buildings financiranog od EEA Grants - Energy and Climate Change Programme).

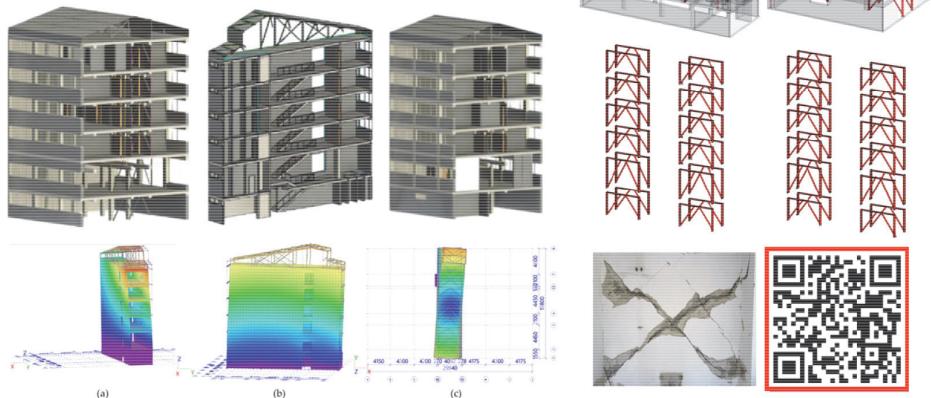


Article

## Condition Assessment and Seismic Upgrading Strategy of RC Structures—A Case Study of a Public Institution in Croatia

Mislav Stepinac <sup>1</sup>, Dominik Skokandic <sup>1,\*</sup>, Karlo Ozić <sup>1</sup>, Margareta Zidar <sup>2</sup> and Matija Vajdić <sup>2</sup>

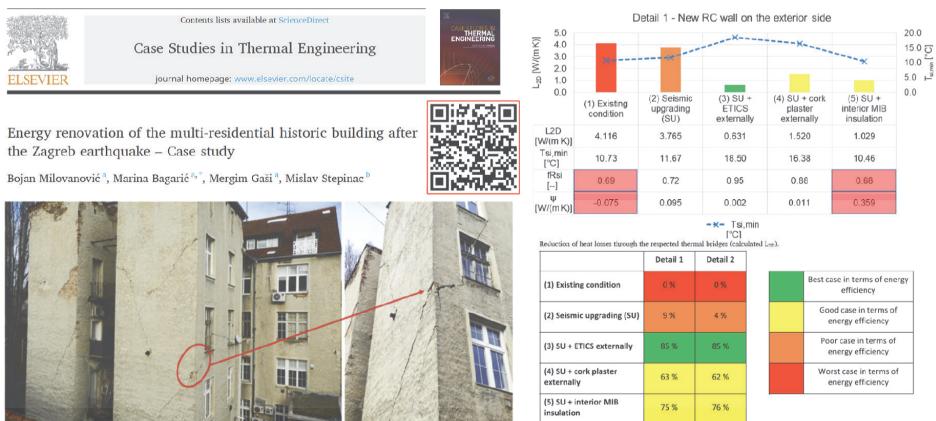
<sup>1</sup> Department for Structures, Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, 10000 Zagreb, Croatia  
<sup>2</sup> Energy Institute Hrvatske Požar, 10000 Zagreb, Croatia  
\* Correspondence: dominik.skokandic@grad.unizg.hr



Slika 9. Procjena stanja i strategija seizmičkog pojačanja AB konstrukcija – studija slučaja javne ustanove u Hrvatskoj

### 4.2.10 Znanstveni članak *Energetska obnova višestambene kulturno zaštićene zgrade nakon zagrebačkog potresa – Studija slučaja [77]*

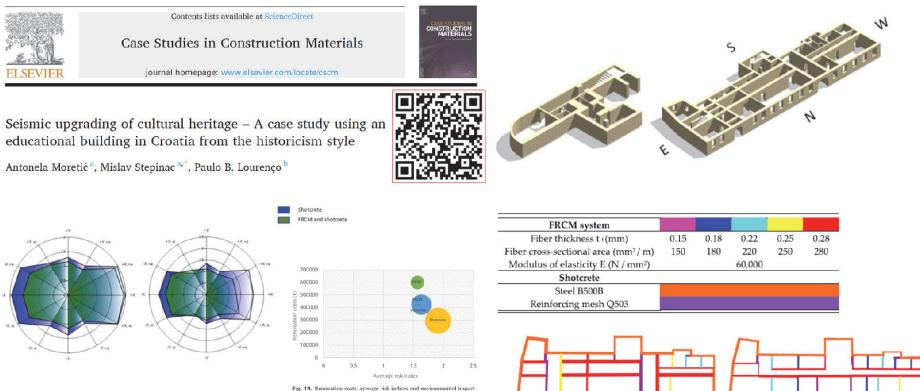
U znanstvenom časopisu *Case studies in Thermal Engineering* 2022. godine objavljen je članak u kojem je prikazan integralni pristup obnovi. Kulturno zaštićene građevine predstavljaju našu kulturnu baštinu i identitet. Zbog svoje starosti i tradicije gradnje izuzetno su osjetljive na seizmička uzbudjenja, a osim toga, među zgradama su s najlošijim energetskim svojstvima. U okviru ovog rada seizmički i energetski integrirani pristup primjenjuje se na tipičnu višestambenu zgradu u zagrebačkoj povjesnoj jezgri. Glavni fokus rada je na mjerama energetske učinkovitosti ovojnice zgrade. Različite varijante toplinske izolacije (vanjske i unutarnje), sekundarnih prozora (održavanje postojećih naspram novih učinkovitih) i ventilacije (prirodno naspram mehaničke s povratom topline) analiziraju se u smislu energetske učinkovitosti zgrade (3D razina). Nadalje, razmatra se zamjena postojećih tehničkih sustava i ugradnja OIE. Štoviše, prihvatljivost predloženih rješenja za naknadnu ugradnju neprozirnih elemenata ocjenjuje se u smislu toplinskih mostova (2D razina) i dugotrajnih higrotermalnih svojstava (1D razina). Nапослјетку, rezultati pokazuju da je čak i za 100 godina staru zgradu moguće ispuniti trenutne nacionalne zahtjeve za primarnu energiju za nove zgrade i pružiti dobru kvalitetu unutarnjeg okoliša uz poštivanje kulturne baštine. Uz ARES projekt, autori zahvaljuju na kompetencijama stečenim kroz EU projekte "BIMzeED" i "The nZEB Roadshow".



Slika 10. Energetska obnova višestambene kulturno zaštićene zgrade nakon zagrebačkog potresa – Studija slučaja

#### 4.2.11 Znanstveni članak *Seizmička pojačanja zgrada kulturne baštine – Studija slučaja na obrazovnoj zgradi u Hrvatskoj u stilu historicizma* [78]

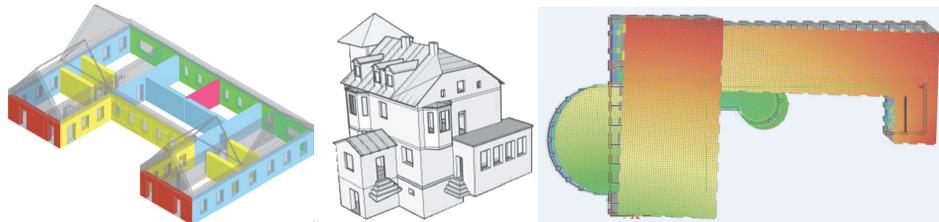
U znanstvenom časopisu *Case studies in Construction Materials* 2022. godine objavljen je članak u kojem su prikazane varijante pojačanja potresom oštećene zgrade u centru Zagreba pod spomeničkom zaštitom. Metode pojačanja kojima se postiže odgovarajuća razina seizmičkog kapaciteta ograničene su kako bi se očuvao identitet ovih građevina. U rukopisu je dan kratak pregled štete obrazovnom sektoru s posebnim osvrtom na obnovu jedne studije slučaja. Studija slučaja je obrazovna zgrada zidane konstrukcije smještena u zagrebačkom Donjem gradu iz 19. stoljeća. Provedena je procjena stanja konstrukcije i izrađen model u softveru 3Muri. Na modelu su primijenjene tri varijante metoda pojačanja – FRCM, torkret i kombinacija FRC-a i torkreta. Na kraju, svaka varijanta modela analizirana je metodom postupnog guranja. Rezultati su uspoređeni s obzirom na postignuti potresni kapacitet, očekivane troškove i utjecaj na okoliš.



Slika 11. Seizmička pojačanja zgrada kulturne baštine – Studija slučaja na obrazovnoj zgradi u Hrvatskoj u stilu historicizma

#### 4.2.12 Ostale publikacije i radovi

U sklopu projekta obranjeno je 10 diplomskih radova, rezultati su predstavljeni kroz 18 radova na znanstvenim i stručnim konferencijama, te su izdana dva poglavlja u knjigama.



Slika 12. Primjeri diplomskih radova

#### 4.3 Buduće aktivnosti

Projekt početkom 2023. godine ulazi u četvrtu godinu te su u planu brojne aktivnosti i diseminacija rezultata. Trenutno su na recenziji 4 rada vezana za nedestruktivna ispitivanja zidanih konstrukcija te procjenu rizika zgrada u blokovima.

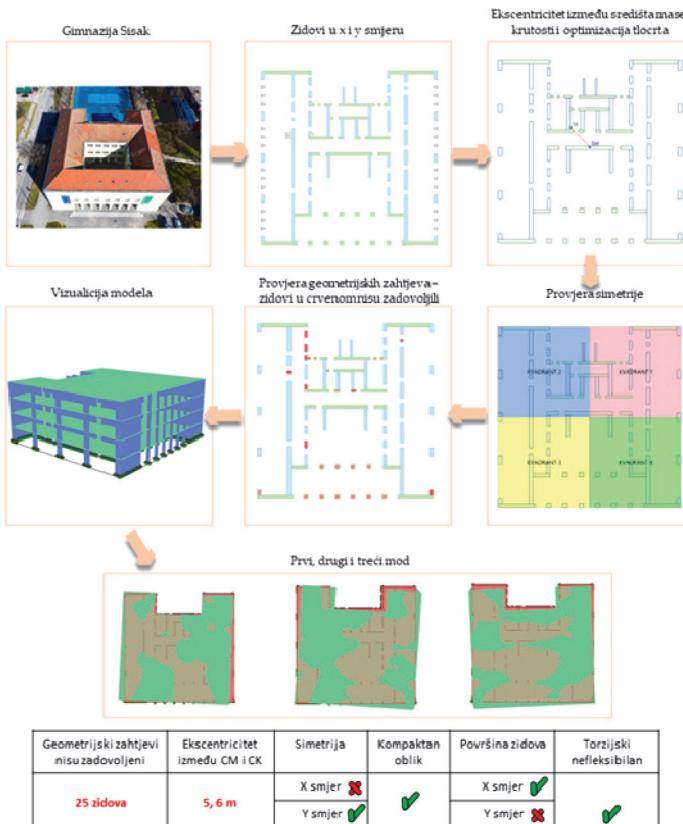
U prvom radu dan je sveobuhvatan osvrt na metode plosnatih preša (flat-jack). Glavni cilj ovog rada je upoznati čitatelja s teoretskom pozadinom i praktičnim pitanjima flat-Jack metode. Prikazani su mogući nedostaci, praktični savjeti i nekoliko poboljšanja metode. Zaključci se temelje na opsežnoj eksperimentalnoj kampanji u procjenama nakon potresa u Hrvatskoj. Rad je poslan u časopis *Construction and Building Materials*.

Drugi rad se bavi eksperimentalnom procjena mehaničkih svojstava nearmiranog ziđa u Hrvatskoj. Glavni fokus ovog rada je na prvom koraku procesa a to je određivanje mehaničkih svojstava ziđa. U tu svrhu koristi se flat-jack metoda. Prijenosom naprezanja s plosnate preše na zid mogu se dobiti korisne informacije. Predstavljeni su rezultati opsežnih ispitivanja nakon potresa na 17 studija slučaja u Hrvatskoj. Rezultati su kritički raspravljeni i prikazana su mehanička svojstva ziđa u mediteranskoj Europi. Cilj ovog rada je povećati razinu pouzdanosti u definiranju mehaničkih svojstava i time povoljno utjecati na potrebnu rekonstrukciju. Ovaj rad od posebne je važnosti za hrvatski građevinski fond jer dobiveni rezultati poprilično odstupaju od konzervativnih pretpostavki danih u novoj generaciji Eurokoda 8. Rad je na recenziji u časopisu *International Journal of Architectural Heritage*. Treći rad bavi se korelacijom dvije metode za određivanje modula elastičnosti ziđa. Uspoređeni su vrijednosti modula elastičnosti dobivene metodama plosnatih preša i metodom udarnog odjeka. Vrijednosti su analizirane i izrađene su studije osjetljivosti. Dobivene vrijednosti moguće je korelirati što je značajni iskorak u procjenama stanja zidanih konstrukcija zbog potpune nedestruktivnosti metode udarnog odjeka. Rad je na recenziji u časopisu *Construction and Building Materials*.

Četvrti rad poslan je u časopis *Bulletin of Earthquake Engineering*. Rad se bavi potresnom oštetljivosti postojećih zidanih konstrukcija u blokovima. Krivulje ranjivosti su izvedene prema europskoj makroseizmičkoj ljestvici (EMS - 98). Usvojena studija slučaja uključuje tri bloka smještena u Donjem gradu u Zagrebu. Do nedavnih potresa baza podataka o štetama od prethodnih potresa nije postojala. Konstruktivna ranjivost uglav-

nom je procijenjena analitičkim metodama, koje nisu bile pravo rješenje za identifikaciju seizmičkog rizika na širim razmjerima, u konačnici na razini države. Baza podataka iz ove serije potresa omogućila je primjenu, validaciju i kalibraciju empirijskih metoda. Primjenjena je metoda temeljena na makroseizmičkom indeksu i na temelju uočenih oštećenja predložene su nove formulacije za procjenu ranjivosti.

Trenutno se intenzivno radi na probabilističkom pristupu ocjeni stanja postojećih zidanih građevina. Trenutno su u pripremi dva rada u kojima su korištene metode Value of Information (VoI) koje su usmjerene na proces odlučivanja u posljie potresnoj obnovi. Također, jedna zanimljiva ideja brze evaluacije i pojednostavljenih izraza za potresni rizik izrađuje se na digitalnoj aplikaciji Grasshopper. Trenutni moderni alati nam nude puno veći spektar mogućnosti nego od onoga za što ih koristimo. Koristeći Grasshopper, parametarski programski paket sadržan u Rhinoceros 3D-u, analizira se utjecaj konceptualnog oblikovanja na ponašanje konstrukcije. Provodi se analiza geometrijskih karakteristika konstrukcija prema kriterijima pravilnosti postavljenih u Eurokodu 1998-1. Najbitniji ispitani parametri su simetrija, kompaktnost, vitkost tlocrta i ekscentričnost konstrukcije. Također, rad je fokusiran na optimizaciju tlocrta postojećih konstrukcija. Cilj optimizacije je smanjenje udaljenosti između centra mase i centra krutosti tlocrta zgrade kako bi se smanjio utjecaj torzije na konstrukciju.



Slika 13. Primjer brze provjere tlocrta postojećeg objekta u Grasshopper-u

Rad na projektu je kontinuiran te se i dalje prikupljaju podaci eksperimentalnih ispitivanja te se rade analize karakterističnih studija slučaja. Projektu se nedavno priključio još jedan doktorand koji će se baviti utjecajem međukatne konstrukcije na globalno ponašanje zidane konstrukcije te analizom tradicionalne sakralne analize u zidu. Svi prijedlozi i, naravno, podaci stručne javnosti su i više nego dobrodošli.

## 5 Umjesto zaključka

Procjena stanja i pojačavanje postojećih građevina jedna je od najvažnijih grana u građevinskom sektoru. Osnovni zahtjevi vezani uz pouzdanost, učinkovitost i uporabljivost kao i postupci temeljeni na graničnim stanjima koji se koriste kod projektiranja novih konstrukcija, koriste se i kod postojećih građevina. Međutim, tehnička pravila za projektiranje novih konstrukcija nisu prikladna za procjenu stanja. Naime kod projektiranja u obzir se uzimaju neke buduće nepouzdanosti u periodu korištenja konstrukcije dok kod procjene stanja i prošlost i budućnost neke građevine imaju jednaku težinu i važnost. Stoga je ekstremno važan razvitet i napredak metoda i tehnika za procjenu stanja i obnovu konstrukcija kako bi se osigurala učinkovita, sigurna i održiva upotreba izgrađene okoline. Uz to, očekuje se da će obnova postojećih građevina biti jedan od važnijih aspekata u trenutnoj reviziji Eurokoda s obzirom na to da još uvijek ne postoje odgovarajuće međunarodne norme za procjenu, adaptaciju i obnovu postojećih građevina. Istraživački projekt će omogućiti dobivanje ključnog znanja u području procjene stanja postojećih zidanih i drvenih konstrukcija, predviđanja svojstava materijala iz NDT metoda te u području povezanosti s probabilitičkim karakteristikama. Stoga je jasno da će rezultati projekta biti kvalitetno rasprostranjeni te će imati značajan učinak na stvaranje i oblikovanje domaćih i međunarodnih normi i pravila, osobito Eurokoda 5 (EN1995) i Eurokoda 6 (EN1996). Uz to, niz specifičnih i značajnih podataka bit će formirano za potrebe oblikovanja Eurokoda 8 koji se bavi projektiranjem građevina na potres.

Članovi istraživačke grupe sudjelovat će u izmjeni znanja i rezultata dobivenih projektom. Bitno je napomenuti da je većina članova istraživačke grupe zastupljena u najvažnijim organizacijama koje se bave istraživačkim i normativnim radom na domaćim i međunarodnim razinama. Članovi su predavači na preddiplomskom i diplomskom studiju građevinarstva te će rezultate prezentirati studentima i članovima stručne zajednice.

U najrazvijenijim društвima, kako napreduju, sve je jasnija potreba i neminovnost za održavanjem postojećeg građevinskog fonda kako bi se sačuvao kulurološki identitet samog društva. Uz kulturnu vrijednost, očuvanje građevina doprinosi i lokalnoj ekonomiji. Očuvanjem se smanjuje otpad, zagađenje zraka uslijed rušenja kao i potreba za izgradnjom novih građevina. Koncepti adaptacije, obnove, manjeg korištenja energije i održavanja također uvelike utječu na održivost građevine. Prvi korak ka svemu navedenom je upravo procjena stanja i obnova konstrukcija, što je i predmet ovog projekta. Novonastala situacija u Republici Hrvatskoj uzrokvana dvama destruktivnim potresima ukazala je na brojne probleme, ali se nadamo da će uspješna suradnja struke i znanosti u području građevinarstva iznjedriti značajne rezultate na svjetskoj razini. Dosadašnja suradnja voditelja i suradnika na ARES projektu sa članovima stručne javnosti je i više nego zadovoljavajuća te se nadamo da će se i proširiti u svrhu kvalitetnijeg razvoja i znanosti i struke.

## Literatura

- [1] Ministry of Construction and Physical Planning Croatia: Proposal of the Long-Term Strategy for Mobilising Investment in the Renovation of the National Building Stock of the Republic of Croatia, Zagreb, 2014.
- [2] Sigmund, Z., Radujkovic, M., Lazarevic, D.: Decision support model for seismic strengthening technology selection of masonry buildings, Tehnički Vjesnik, 23 (2016) 3, pp. 791–800
- [3] Dietsch, P., Kreuzinger, H.: Guideline on the assessment of timber structures: Summary, Eng. Struct., 33 (2011) 11, pp. 2983–2986
- [4] Steiger, R., Kohler, J.: Development of New Swiss Standards for the Reassessment of Existing Load Bearing Structures, CIB-W18 Meeting 41, 2008.
- [5] Diamantidis, D.: Probabilistic Assessment of Existing Structures - A publication for the Joint Committee on Structural Safety, 2001.
- [6] Dietsch, P., Kohler, J.: Assessment of Timber Structures, Shaker Verlag, 2010.
- [7] Tannert, T. et al.: In situ assessment of structural timber using semi-destructive techniques, Mater. Struct. Constr., 47 (2014) 5, pp. 767–785
- [8] Fink, G., Kohler, J.: Quantification of different NDT/SDT methods in respect to estimate the load-bearing capacity, Constr. Build. Mater., 101 (2015), pp. 1181–1187
- [9] Stepinac, M., Rajčić, V., Barbalić, J.: Inspection and condition assessment of existing timber structures, Gradjevinar, 69 (2017) 9, pp. 861- 873
- [10] Görlacher, R.: Hölzerne Tragwerke: Untersuchen Und Beurteilen in: Sonderforschungsbereich 315: Erhalten Historische Bedeutsamer Bauwerke, Berlin, Verlag Ernst & Sohn, 1996.
- [11] Aicher, S.: Verfahren Und Aussagemöglichkeiten Bei Der Begutachtung von Holzkonstruktionen, Berlin, 2008.
- [12] Piazza, M., Riggio, M.: Visual strength-grading and NDT of timber in traditional structures, J. Build. Apprais., 3 (2008) 4, pp. 267–296
- [13] Svensson, S., Turk, G., Hozjan, T.: Predicting moisture state of timber members in a continuously varying climate, Eng. Struct., 33 (2011) 11, pp. 3064–3070
- [14] Dietsch, P., Gamper, A., Merk, M., Winter, S.: Monitoring building climate and timber moisture gradient in large-span timber structures, J. Civ. Struct. Heal. Monit., 2015.
- [15] Hansen, C. P.: Technical note No. 55 – July 2000 Application of the Pilodyn in by Citation, DFSC Ser. Tech. Notes, 2000.
- [16] Rinn, F., Schweingruber, F. H., Schär, E.: ResistographH and X-ray density charts of wood comparative evaluation of drill resistance profiles and X-ray density charts of different wood species, Holzforschung, 1996.
- [17] Brashaw, B. K., Vatalaro, R. J., Wacker, J. P., Ross, R. J.: Condition Assessment of Timber Bridges 1. - Evaluation of a Micro-Drilling Resistance Tool, Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-159, 2005.
- [18] Scott, C., Hernandez, R., Frihart, C., Gleisner, R., Tice, T.: Method for Quantifying Percentage Wood Failure in Block-Shear Specimens by a Laser Scanning Profilometer, Advances in Adhesives, Adhesion Science and Testing, 2008.
- [19] Steiger, R., Gehri, E., Richter, K.: Quality control of glulam: shear testing of bondlines Qualitätskontrolle von Brettschichtholz: Scherprüfung von Klebefugen, Eur. J. Wood Prod., 2010.

- [20] Lehmann, E., Vontobel, P., Scherrer, P., Niemz, P.: Anwendung der Methode der Neutronenradiographie zur Analyse von Holzeigenschaften, Holz als Roh- und Werkst., 2002.
- [21] Anthony, R. W.: Investigation of historic timber structures using portable x-ray technology, Proceedings of the international conference: Conservation of Historic Wooden Structures, Florence, February 22-27, 2005.
- [22] Leyder, C., Wanninger, F., Frangi, A., Chatzi, E.: Dynamic response of an innovative hybrid structure in hardwood, Proc. Inst. Civ. Eng. Constr. Mater., 2015.
- [23] Sfara, S., Theodorakeas, P., Avdelidis, N. P., Kouli, M.: Thermographic, ultrasonic and optical methods: A new dimension in veneered wood diagnostics, Russ. J. Nondestruct. Test., 2013.
- [24] Carpenterier, O., Chartier, O., Antczak, E., Descamp, T., Van Parys, L.: Active and quantitative infrared thermography using frequential analysis applied to the monitoring of historic timber structures, International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures, 2015, pp. 61–70
- [25] Kasal, B., Anthony, R. W.: Advances in situ evaluation of timber structures, Prog. Struct. Eng. Mater., 6 (2004) 2, pp. 94–10
- [26] Machado, J. S., Riggio, M., D’Ayala, D.: Assessment of structural timber members by non- and semi-destructive methods, Constr. Build. Mater., 101 (2015), pp. 1155–1156
- [27] Stepinac, M., Rajčić, V., Honfi, D.: Condition Assessment of Timber Structures – Quantifying the Value of Information, IABSE SYMPOSIUM NANTES, 2018 Tomorrow’s Megastructures International Association for Bridge and Structural Engineering, 2018., pp. S27-9
- [28] Borri, A., Corradi, M., De Maria, A., Sisti, R.: Calibration of a visual method for the analysis of the mechanical properties of historic masonry, Procedia Struct. Integr., 11 (2018), pp. 418–427
- [29] Breysse, D., Martínez-Fernández, J. L.: Assessing concrete strength with rebound hammer: Review of key issues and ideas for more reliable conclusions, Mater. Struct. Constr., 47 (2014) 9, pp. 1589–1604
- [30] Sýkora, M., Diamantidis, D., Holický, M., Marková, J., Rózsás, Á.: Assessment of compressive strength of historic masonry using non-destructive and destructive techniques, Constr. Build. Mater., 193 (2018), pp. 196–210
- [31] Agred, K., Klysz, G., Balayssac, J. P.: Location of reinforcement and moisture assessment in reinforced concrete with a double receiver GPR antenna, Constr. Build. Mater., 188 (2018), pp. 1119–1127
- [32] Sajid, S. H., Ali, S. M., Carino, N. J., Saeed, S., Sajid, H. U., Chouinard, L.: Strength estimation of concrete masonry units using stress-wave methods, Constr. Build. Mater., 163 (2018), pp. 518–528
- [33] Mesquita, E., Martini, R., Alves, A., Antunes, P., Varum, H.: Non-destructive characterization of ancient clay brick walls by indirect ultrasonic measurements, J. Build. Eng., 19 (2018), pp. 172–180
- [34] Martini, R., Carvalho, J., Barraca, N., Arêde, A., Varum, H.: Advances on the use of non-destructive techniques for mechanical characterization of stone masonry: GPR and sonic tests, Procedia Struct. Integr., 5 (2017), pp. 1108–1115
- [35] Valluzzi, M. R. et al.: Calibration of sonic pulse velocity tests for detection of variable conditions in masonry walls, Constr. Build. Mater., 192 (2018), pp. 272–286
- [36] Wai-Lok Lai, W., Dérobert, X., Annan, P.: A review of Ground Penetrating Radar application in civil engineering: A 30-year journey from Locating and Testing to Imaging and Diagnosis, NDT E Int., 96 (2018) 1, pp. 58–78
- [37] Meola, C.: Infrared thermography of masonry structures, Infrared Phys. Technol., 49 (2007) 3, SPEC. ISS., pp. 228–233

- [38] Schuller, M. P.: Nondestructive testing and damage assessment of masonry structures, *Prog. Struct. Eng. Mater.*, 5 (2003) 4, pp. 239–251
- [39] Parivallal, S., Kesavan, K., Ravisankar, K., Sundram, B. A., Ahmed, A. K. F.: Evaluation of in-situ stress in masonry structures by flat jack technique, *Natl. Semin. Exhib. Non-Destructive Eval.*, 2011., pp. 8–13
- [40] Łatká, D., Matysek, P.: The Estimation of Compressive Stress Level in Brick Masonry Using the Flat-jack Method, *Procedia Eng.*, 193 (2017), pp. 266–272
- [41] Simões, A., Gago, A., Bento, R., Lopes, M.: Flat-Jack Tests on Old Masonry Buildings, *15th Int. Conf. Exp. Mech.*, 1 (2012), pp. 3056
- [42] Croce, P. et al.: Shear modulus of masonry walls: a critical review, *Procedia Struct. Integr.*, 11 (2018), pp. 339–346
- [43] Invernizzi, S., Lacidogna, G., Lozano-Ramírez, N. E., Carpinteri, A.: Structural monitoring and assessment of an ancient masonry tower, *Eng. Fract. Mech.*, 2018.
- [44] Madsen, H. O., Krenk, S., Niels, C. L.: *Methods of Structural Safety*, Courier Corporation, 2006.
- [45] Argyris, C., Papadimitriou, C., Panetsos, P., Tsopelas, P.: Model calibration of metsovo bridge using ambient vibration measurements from various construction phases, 2017.
- [46] Beck, J. L., Au, S.-K.: Bayesian Updating of Structural Models and Reliability using Markov Chain Monte Carlo Simulation, *J. Eng. Mech.*, 2002.
- [47] Papadimitriou, C., Papadioti, D. C.: Component mode synthesis techniques for finite element model updating, *Comput. Struct.*, 2013.
- [48] Simoen, E., Lombaert, G.: Bayesian parameter estimation, *CISM International Centre for Mechanical Sciences, Courses and Lectures*, 2016.
- [49] Dymiotis, C., Gutleiderer, B. M.: Allowing for uncertainties in the modelling of masonry compressive strength, *Constr. Build. Mater.*, 16 (2002) 8, pp. 443–452
- [50] ISO: ISO 13822 Bases for design of structures - Assessment of existing structures, ISO 138222010, 2010.
- [51] SIA: Guideline SIA 462: Assessment of the Structural Safety of Existing Buildings, Zurich, Switzerland, 1994.
- [52] NEN: NEN 8700: Assessment of Existing Structures in Case of Reconstruction and Disapproval - Basic Rules, 2011.
- [53] SIA: Standard SIA 469: Maintenance of Buildings, Zurich, Switzerland, 1997.
- [54] Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 3: Assessment and retrofitting of buildings, EN 1998-3, CEN, 2004.
- [55] Derakhshan, H.: Proposed Update to Masonry Provisions of ASCE/SEI 41: Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, *15th World Conf. Earthq. Eng.*, 2012.
- [56] Pekelnicky, R., Poland, C.: ASCE 41-13: Seismic Evaluation and Retrofit Rehabilitation of Existing Buildings, Citeseer, 2012.
- [57] Rücker, P. W., Hille, D. F., Rohrmann, D. R.: F08a Guideline for the Assessment of Existing Structures, 2006., pp. 48
- [58] Sousa, H. S., Sørensen, J. D., Kirkegaard, P. H., Branco, J. M., Lourenço, P. B.: On the use of NDT data for reliability-based assessment of existing timber structures, *Eng. Struct.*, 56 (2013), pp. 298–311
- [59] J. Kohler and G. Fink, Reliability based code calibration of typical eurocode 5 design equations, *World Conference on Timber Engineering 2012, WCTE 2012*, 2012.

- [60] Köhler, J., Sørensen, J. D., Faber, M. H.: Probabilistic modeling of timber structures, *Struct. Saf.*, 29 (2007) 4, pp. 255–267
- [61] Holicky, M.: Probabilistic Model for Masonry Strength, 17 (2010) 1, pp. 61–70
- [62] Schueremans, L.: Reliability Analysis in Structural Masonry Engineering 2 - Local probability of failure of masonry shear panels, *Civ. Eng.*, 1995.
- [63] Vailati, M., Monti, G., Khazna, M. J., Napoli, A., Realfonzo, R.: Probabilistic assessment of masonry building clusters, *Proc. 15th World Conf. Earthq. Eng. - WCEE*, 2012., pp. 9
- [64] Asteris, P. G. et al.: Stochastic Vulnerability Assessment of Masonry Structures: Concepts, Modeling and Restoration Aspects, 9 (2019) 2.
- [65] Rota, M., Penna, A., Magenes, G.: A framework for the seismic assessment of existing masonry buildings accounting for different sources of uncertainty, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 43 (2014) 7, pp. 1045–1066
- [66] Raiffa, H., Schlaifer, R.: *Applied statistical decision theory*, Boston: Harvard University Press, 1961.
- [67] Faber, M. H., M.A., M.: On Applied Engineering Decision Making for Society, 12th IFIP WG7.5 Working Conference on Reliability and Optimization of Structural Systems, 2005.
- [68] Stepinac, M. et al.: Damage classification of residential buildings in historical downtown after the ML5.5 earthquake in Zagreb, Croatia in 2020, *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, 56 (2021), p. 102140
- [69] Stepinac, M., Kisicek, T., Renić, T., Hafner, I., Bedon, C.: Methods for the Assessment of Critical Properties in Existing Masonry Structures under Seismic Loads—The ARES Project, *Appl. Sci.*, 10 (2020) 2, pp. 1576
- [70] Stepinac, M., Gašparović, M.: A Review of Emerging Technologies for an Assessment of Safety and Seismic Vulnerability and Damage Detection of Existing Masonry Structures, *Appl. Sci.*, 10 (2020) 15.
- [71] Lulić, L., Ožić, K., Kišiček, T., Hafner, I., Stepinac, M.: Post-earthquake damage assessment-case study of the educational building after the zagreb earthquake, *Sustain.*, 2021.
- [72] Kišiček, T., Stepinac, M., Renić, T., Hafner, I., Lulić, L.: Strengthening of masonry walls with FRP or TRM, *Gradjevinar*, 72 (2020) 10, pp. 937–953
- [73] Milić, M., Stepinac, M., Lulic, L., Ivanisevic, N., Matoric, I., Cacic Sipos, B.: Assessment and Rehabilitation of Culturally Protected Prince Rudolf Infantry Barracks in Zagreb after Major Earthquake, *Buildings*, 2021.
- [74] Perković, N., Stepinac, M., Rajčić, V., Barbalić, J.: Assessment of Timber Roof Structures before and after Earthquakes, *Build.*, 11 (2021) 11, pp. 528
- [75] Hafner, I., Lazarević, D., Kišiček, T., Stepinac, M.: Post-Earthquake Assessment of a Historical Masonry Building after the Zagreb Earthquake—Case Study, *Buildings*, 12 (2022) 3
- [76] Stepinac, M., Skokandić, D., Ožić, K., Zidar, M., Vajdić, M.: Condition Assessment and Seismic Upgrading Strategy of RC Structures—A Case Study of a Public Institution in Croatia, *Buildings*, 12 (2022) 9, pp. 1489
- [77] Milovanovic, B., Bagaric, M., Gašić, M., Stepinac, M.: Energy renovation of the multi-residential historic building after the Zagreb earthquake - Case study, *Case Stud. Therm. Eng.*, 38 (2022) 7.
- [78] Moretić, A., Stepinac, M., Lourenço, P. B.: Seismic upgrading of cultural heritage – A case study using an educational building in Croatia from the historicism style, *Case Stud. Constr. Mater.*, 17 (2022) 12, p. e01183



## **Monitoring i analiza vibracija od prolaska tramvajskog vozila u svrhu zaštite zgrada oštećenih u potresu**

Autori:

**Doc.dr.sc. Ivo Haladin, prof.dr.sc. Stjepan Lakušić,  
Krešimir Burnać**

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb

## **Monitoring i analiza vibracija od prolaska tramvajskog vozila u svrhu zaštite zgrada oštećenih u potresu**

Ivo Haladin, Stjepan Lakušić, Krešimir Burnać

### **Sažetak**

Okosnicu javnog gradskog prijevoza u gradu Zagrebu čini tramvajska mreža koja u velikom dijelu prolazi kroz staru gradsku jezgru u neposrednoj blizini okolnih zgrada. U potresu koji je zadesio grad Zagreb 22.03.2020. oštećene su mnoge zgrade u užem centru grada kao i dio tramvajske infrastrukture (oštećeni prihvati kontaktne mreže na zgradama, zaustavljen promet zbog padanja dijelova zgrada na tramvajske kolosijeke). U urbanim sredinama vibracije se prenose kroz tlo do okolnih građevina koje su često u neposrednoj blizini kolosijeka i kao takve mogu imati značajan utjecaj na ljude koji žive ili rade u blizini i na same građevine. Nakon potresa napravljena je analiza rizika utjecaja vibracija od prometa na građevine prema kojoj su određene kritične lokacije za uvođenje mjera za smanjenje vibracija. U ovom radu napravljen je pregled monitoringa vibracija na kolosijeku i na zgradama sa primjerom dugotrajnog monitoringa vibracija na zidanoj zgradi oštećenoj u potresu (na adresi Frankopanska 1).

**Ključne riječi:** monitoring, vibracije, potres, tramvajski kolosijek, zaštita zgrada

### **Monitoring and analysis of vibrations coming from tramway vehicle pass-by for protection of the buildings damaged in the event of an earthquake**

### **Abstract**

An integral part of public transport in the city of Zagreb is the tram network, which largely passes through the old city centre in the immediate vicinity of the surrounding buildings. In the earthquake that hit the city of Zagreb on March 22, 2020. many buildings in the inner-city centre were damaged along with the tram infrastructure (damaged overhead line supports on buildings, interrupted tramway traffic due to parts of buildings falling onto tram tracks). In urban areas, vibrations are transmitted through the ground to the surrounding buildings, often in the tracks' immediate vicinity. As such, they can significantly impact the people who live or work nearby and the buildings themselves. After the earthquake, a risk analysis of the impact of vibrations from traffic on buildings was made, according to which critical locations were determined for the introduction of measures to reduce vibrations. In this paper, an overview of monitoring of vibrations on the track and on buildings was made with an example of long-term monitoring of vibrations on a masonry building damaged in an earthquake (at the address Frankopanska 1).

**Key words:** monitoring, vibrations, earthquake, tramway track, buildings protection

## 1 Uvod

Mreža tramvajskih kolosijeka čini okosnicu javnog gradskog prijevoza grada Zagreba. Zbog toga je nakon potresa koji je zadesio grad Zagreb 22. ožujka 2020. godine jedan od prioriteta bio ponovo uspostaviti sustav javnog gradskog prijevoza tramvajima, no to nije bilo nimalo jednostavan poduhvat. U danima nakon potresa stručnjaci Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu na poziv Zagrebačkog električnog tramvaja, detaljno su pregledali ključne komponente koje čine sustav tramvajske infrastrukture. Pregledane su i ispitane sve zgrade ispravljačkih stanica, koje napajaju mrežu strujom. Zatim je proveden opsežan pregled svih prihvata tramvajske kontaktne mreže koja je u središtu grada sidrena u pročelja okolnih zgrada. Ovaj korak bio je od iznimne važnosti zbog oštećenih pročelja građevina, te pada dijelova građevine na samu kontaktну mrežu čime je on pretrpjela određena oštećenja. Detaljno su pregledani i tramvajski kolosijeci kako bi se uočila eventualna oštećenja uslijed potresa, ali i radnih strojeva koji su otklanjali posljedice potresa sa okolnih građevina. Sve aktivnosti odvijale su se u fazama, te je promet tramvaja, konačno uspostavljen svim standardnim linijama centrom grada 30. lipnja 2020. Međutim, aktivnosti vezane uz tramvajsku infrastrukturu i potres nikako nisu završile puštanjem sustava u promet. Uspostavom tramvajskog prometa kroz strogi centar grada započela je faza monitoringa vibracija koje bi, u određenim ekstremnim slučajevima mogle našteti građevinama već oštećenim u potresu.



Slika 1. Prikaz rozete i prihvata kontaktne mreže na fasadi oštećene građevine - lijevo, ispitivanje nosivosti prihvata kontaktne mreže na fasadi građevine – lijevo

U urbanim sredinama vibracije od prometa prenose se tlom do okolnih građevina koje su u strogom centru grada u neposrednoj blizini prometnica [1]. Takve vibracije mogu biti primjetne ljudima koji u zgradama u blizini vrlo frekventnih prometnica, dok u određenim slučajevima mogu izazivati ozbiljnu neugodu, a mogu imati utjecaj i na same građevine [2]. Tramvajska vozila u interakciji s kolosijekom po kojem generiraju vibracije koje, ako nisu kontrolirane, mogu izazvati učinak sličan potresu manjeg intenziteta [3]. Takve pojave su nakon potresa u Zagrebu prijavljivali su uznenimireni građani, koji su na-

kon traume potresa, ponovnom uspostavom tramvajskog prometa, vibracije primjećivali mnogo intenzivnije nego prije. Osim subjektivnog osjećaja vibracija, postoje određene razine vibracija koje objektivno mogu stvarati ugrozu za građevine [4]. Stoga je nužno analizirati stanje tračničke infrastrukture i njenu sposobnost da apsorbira vibracije, te prijenos vibracija na okolne građevine. Razvoj mjernih sustava s naprednom obradom signala vibracija omogućava monitoring stanja vibracija na tramvajskom kolosijeku korišteći standardno tramvajsko vozilo u redovnom prometu, koje prikuplja podatke a analiza se provodi gotovo u realnom vremenu.

Usljed potresa od 5,5 stupnjeva po Richteru koji je 22. ožujka 2020. pogodio grad Zagreb, značajno su stradale višekatne zidane zgrade na širem gradskom području, a osobito u staroj gradskoj jezgri. Vrlo važna značajka stare gradske jezgre jest ta da je integrirana u sustav javnog gradskog prijevoza tramvajskom mrežom koja se rasprostire dvjema trasama u smjeru pružanja istok-zapad. Iz dispozicije mreže na slici 2., vidljivo je da tramvajski kolosijek prolazi samom gradskom jezgrom, uskim ulicama, te vrlo blizu oštećenih građevina.

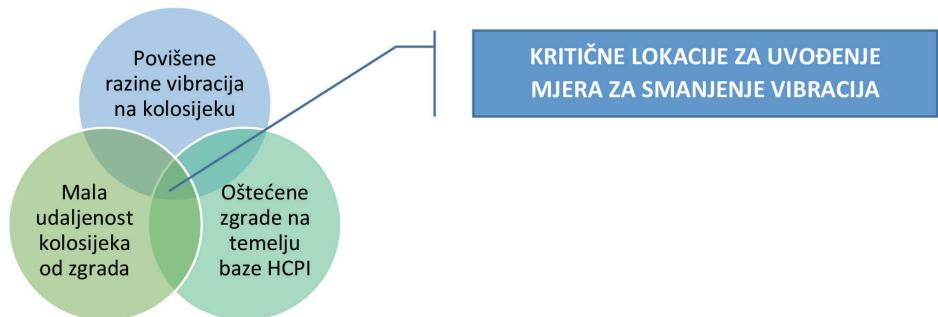


Slika 2. Prikaz zagrebačke tramvajske mreže u užem centru grada sa prikazom zgrada nakon inicijalnog pregleda; označene kao uporabljive (zeleno), privremene uporabljive (narančasto) i neuporabljive (crveno)

## 2 Analiza rizika utjecaja vibracija od prometa na građevine

Analiza utjecaja vibracija od tramvajskog prometa na potresom oštećene građevine vrlo je kompleksan inženjerski zadatak jer zahtijeva interdisciplinarni pristup niza stručnjaka (statičara, projektanata, geotehničara, eksperata za kolosiječne konstrukcije te eksperata za analizu vibracija) kako bi se utvrdio utjecaj relativno male pobude (vibracije pri prolasku tramvajskog vozila) ponavljajućeg karaktera (frekvencija prolaska tramvajskih vozila u određenim presjecima je i veća od 60 vozila u 1 h) na potresom oštećene građevine. Glavna pretpostavka jest ta da razina vibracija koju proizvode tračnička vozila neće izazvati oštećenja na nosivim elementima građevina [5]. Međutim, pojedini elementi konstrukcije (kao što su dimnjaci, zabatni zidovi, ornamenti, vijenci i sl.) koji su uslijed potresa znatno oštećeni, bez adekvatne sanacije mogli bi se dodatno oštetiti

uslijed relativno male pobude koju proizvode tračnička vozila te se na taj način i ugroziti sigurnost stanara i ostalih građana. Budući da zidane građevine nisu otporne na vlačna naprezanja, uslijed djelovanja vibracija javlja se oštećenje žbuke te odvajanje zidanih elemenata, što može rezultirati postupnim smanjivanjem otpornosti cijele konstrukcije [3]. Preliminarnim uvidima uočena su oštećenja na građevinama izazvana izravno potresnim djelovanjem (zgrade, postrojenja), te posredno, uslijed pada materijala sa oštećenih građevina na tračničku infrastrukturu (kontaktnu mrežu i tramvajski kolosijek).



Slika 3. Schematski prikaz analize rizika za definiciju kritičnih lokacija za uvođenje mjera za smanjenje vibracija

Udaljenost okolnih građevina od prometnice (tramvajskog kolosijeka) uvelike ovisi o intenzitetu vibracija koja se prenosi od izvora (kolosijek) do prijemnika (građevine) [6]. Analizom tramvajske mreže u širem središtu grada Zagreba, ustanovljeno je kako je 35 % kolosijeka najmanje od 7 m udaljen od pročelja zgrada, 38 % kolosijeka 7 do 15 m od fasada, 12 % kolosijeka više od 15 do 25 m od fasada, a 15 % kolosijeka udaljen je više od 25 m od fasade zgrada. S obzirom na blizinu izvora vibracija, moguće je definirati određene zone rizika gdje bi eventualne vibracije od tramvajskog prometa mogle utjecati na zgrade stradale u potresu [7].

### 3 Monitoring vibracija na tramvajskom kolosijeku

Monitoring vibracija od tramvajskog prometa za cilj ima analizirati dugotrajne i kratkotrajne učinke potresa na tračničku infrastrukturu te utjecaj prometa tramvajskih vozila na potresom stradale građevine. Ispitivanja su provođena su kroz 3 glavne aktivnosti [8]. Prva aktivnost podrazumijevala je preliminarno ispitivanje vibracija od tramvajskog prometa i rada postojećih pukotina, provedena na zgradici HŽ Infrastrukture (Mihanovićeva ulica 12) značajno oštećenoj u potresu, slika 4. U ovoj fazi kroz 7 dana motrene su vibracije u građevini u 10 karakterističnih točaka, u tri okomita smjera, dok su pukotine nastale u potresu praćene na pet lokacija u građevini te je analiziran prolazak značajnog broja tramvajskih vozila. Druga faza obuhvaćala je monitoring vibracija uz pomoć tramvajskog vozila na mreži tramvajskih kolosijeka ZET-a dok je u posljednjoj fazi provođen monitoring vibracija na građevinama u blizini kolosijeka. Druga i treća faza provedene su simultano u trajanju od šest mjeseci.



Slika 4. Preliminarni monitoring vibracija na zgradi HŽ Infrastrukture

Na cijelokupnoj mreži tramvajskih kolosijeka u Zagrebu napravljen je dugotrajni monitoring razina vibracija mjerena na tramvajskom vozilu u svrhu ocjene stanja kolosijeka i određivanja pojedinih lokacija sa značajno povišenim vibracijama na kolosijeku. Prikupljanje podataka u svrhu monitoringa obavljano je kontinuiranim mjeranjem razina vibracija prilikom vožnje tramvaja prema planiranom rasporedu kako bi se obuhvatila cijela tramvajska mreža. Analizom razina vibracija definirane su na kolosijeku na kojima je potrebna intervencija kako bi se smanjile vibracije na izvoru. Te lokacije sanirane su ili su u postupku pripreme sanacije od strane upravitelja infrastrukturom (ZET). Primjer analize jedne takve lokacije (na raskrižju Frankopanske ulice i Ilice) prikazan je na slici 5., usporedbom razina vibracija prije i nakon intervencije na kolosijeku (izmjena elemenara križališta). Razine vibracija prije intervencije bile su povišene (u prosjeku iznad 160 dB, prikazano crvenom bojom), a izmjenom križališta smanjene su preko 10 dB.



Slika 5. Prikaz smanjenja razina vibracija izmjerena na tramvajskom vozilu na raskrižju Frankopanska – Ilica prije (lijevo) i nakon zamjene križališta (desno) (izvor – arhiva GF)

Ovakvo smanjenje razina vibracija dobar je indikator kako se dugotrajnim monitorin-  
gom mogu detektirati lokacije s povišenim vibracijama i dati preporuka upravitelju infra-  
strukturu o hitnosti interveniranja na kolosijeku u svrhu smanjivanja povišenih razina  
vibracija koje mogu imati potencijalno negativan učinak na obližnje zgrade i ljudi koji u  
njima borave.

## 4 Monitoring vibracija na građevinama

U sklopu posljednje aktivnosti monitoringa vibracije od prolaska tramvajskih vozila praćene su na samim oštećenim građevinama u blizini tramvajske pruge [8]. Građevine na kojima je planiran šestomjesečni monitoring odabранe su na temelju analize rizika koja je obuhvaćala sljedeće faktore: ocjene stanja građevina nakon potresa (žuta ili crvena naljepnica), udaljenost građevine od kolosijeka, te stanje vibracija na tramvajskom kolosijeku ispred same građevine. Uz pomoć ova 3 parametra definirane su 4 građevine na kojima proveden dugotrajan monitoring stanja vibracija koje su potencijalno opasne za građevinu.

Ciljevi aktivnosti monitoringa na građevinama u blizini tramvajskog kolosijeka uključuju:

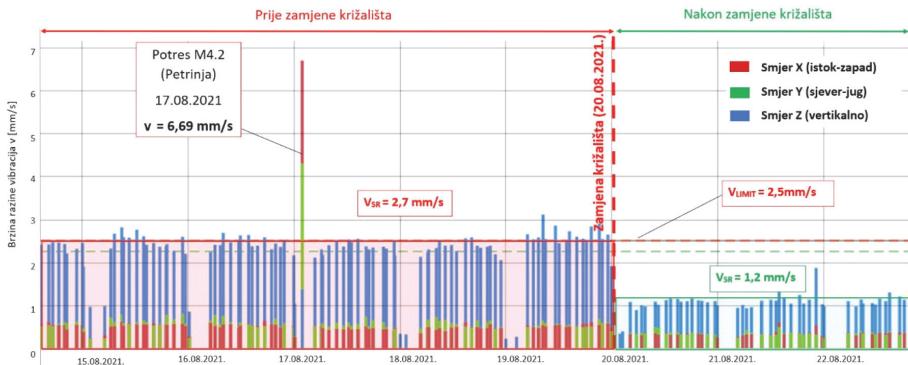
- identifikaciju lokacije s najvećim razinama vibracija od tramvajskog prometa u svakoj pojedinoj građevini
- praćenje razine vibracija na mjestu najvećih razina vibracija u objektu sukladno smjernicama norme HRN DIN 41503 [9] te utvrditi postoji li štetan utjecaj na građevine oštećene u potresu
- utvrditi utjecaj tipa vozila, režima vožnje i stanja kolosijeka (rekonstrukcija) na razine vibracija u građevinama.



Slika 6. Mjerna lokacija na 2. etaži zgrade (Frankopanska 1) – lijevo, mjerni uređaj za monitoring postavljen na nosivi zid građevine – desno

Monitoring je provođen sofisticiranim mjernim sustavom vrlo kompaktne konstrukcije, koji, montažom na nosivi element građevine i spajanjem na napajanje (220 V ili baterija), kontinuirano bilježi i putem mobilne mreže, u bazu podataka šalje, podatke o vibracijama koje su prekoračile određeni unaprijed zadani prag, slika 6. Prije postavljanja opreme za dugotrajni monitoring, izvršen je sedmodnevni kratkoročni monitoring u više točaka na svakoj od građevina kako bi se odredila lokacije na zgradama na kojima se javljaju najviše razine vibracija. Najviše razine vibracija u pravilu su izmjerene na nosivim zidovima najviših etaža građevina te je na ta mjesta postavljena oprema za dugotrajni monitoring vibracija. Za analizu potencijalnih utjecaja tramvajskog prometa na građevine stradale u potresu, uzeti su najstroži kriteriji koji nudi gore navedena norma – utjecaja trajnih, ponavljajućih vibracija, na osjetljive građevine, odnosno vršna vrijednost vibracijskih brzina od  $v = 2,5 \text{ mm/s}$ .

Prilikom provedbe monitoringa praćene su i bilježene sve pojave koje su utjecale na građevinu, pa su osim tramvajskog prometa, zabilježeni i brojni naknadni potresi (podrhtavanja), što sa zagrebačkog, a što sa petrinjskog epicentralnog područja. Također su analizirani efekti sanacija koje provodi upravitelj infrastrukturom (ZET) na razine vibracija koje se prenose na građevine. Na slici 7. prikazana je promjena u razinama vibracija prije i nakon intervencije na kolosijeku, zabilježenih na zgradu sa adresom Frankopanska 1 (na raskriju Frankopanske ulice i Ilice). Prije intervencije na kolosijeku (izmjene križališta) prosječne razine vibracija neznatno su prelazile definiranu granicu od 2,5 mm/s, dok su se one gotovo prepovolile nakon izmjene tramvajskog križališta. Također, iz prikaza na slici 7. vidljive su razine vibracije koje su zabilježene prilikom potresa u Petrinji od 4.2 stupnja prema Richteru. Takve vibracije su nekoliko puta veće od razina vibracija koje se javljaju prilikom prolaska tramvajskog vozila po kolosijeku (kako prije intervencije tako i nakon intervencije). Treba napomenuti da su vibracije koje dosežu granične vrijednosti, prije zamjene križališta na lokaciji Frankopanska 1 ujedno i najveće razine zabilježene u sklopu kompletne aktivnosti monitoringa na svim objektima. Na svim ostalim lokacijama, vrijednosti razine vibracija znatno su manjeg intenziteta.



Slika 7. Prikaz razina vibracija izmjerjenih na zgradama prije i nakon intervencije na kolosijeku na raskriju Ilica – Frankopanska (izvor – arhiva GF)

## 5 Zaključak

Dugotrajnim monitoringom vibracija uz pomoć tramvajskog vozila moguće je dati preporuke za daljnje postupanje s obzirom na zabilježene razine vibracija na pojedinačnim lokacijama, te osvrт na izvršene interventne radove na pojedinim lokacijama. Temeljita rekonstrukcija kolosijeka (npr. na križanju Ilica – Frankopanska) ima značajan utjecaj na smanjenje razina vibracija kako na kolosijeku tako i na zgradama u blizini kolosijeka. Na bazi trenda rasta ili pada razine vibracija kroz duži vremenski period moguće je na temelju kontinuiranog monitoringa planirati pravovremene i ciljane intervencije na tramvajskoj infrastrukturi. Također je moguće na vrijeme i precizno detektirati nove lokacije s povišenim i potencijalno štetnim razinama vibracija kako za tramvajska vozila, kolosijek, tako i za okolne građevine. Analizom relativne promjene vibracija nakon izvršenih re-

konstrukcija uz kontinuirani monitoring također je moguće verificirati učinkovitost primjenjenih metoda sanacije što je i krajnji cilj ovakvih aktivnosti u smjeru smanjivanja vibracija potencijalno neugodnih vibracija kako bi se produžio životni vijek tramvajske infrastrukture i osiguralo što ugodniji suživot tramvajskog javnog prijevoza i građana koji žive u njegovoј neposrednoj blizini

## Literatura

- [1] Lakušić S, Haladin I, Bogut M. Influence of tram induced vibration on underground garage structure. CETRA 2014 3rd International Conference on Road and Rail Infrastructure Proceedings, 2014, p. 549–55.
- [2] Haladin I, Bogut M, Lakušić S. Analysis of tram traffic-induced vibration influence on earthquake damaged buildings. Buildings 2021;11. <https://doi.org/10.3390/buildings11120590>.
- [3] Tomažević M, Žnidarič A, Klemenc I, Lavrič I. The influence of traffic induced vibrations on historic stone masonry buildings. In Proceedings of the 12th European Conference on Earthquake Engineering, London, UK, 9–13 September 2002., Stationery Office; 2002, p. 631.
- [4] HRN DIN 4150-2:1999 Structural vibration - Human exposure to vibration in buildings. 1999.
- [5] Erkal A. Transmission of Traffic-induced Vibrations on and around the Minaret of Little Hagia Sophia. International Journal of Architectural Heritage 2017;11:349–62. <https://doi.org/10.1080/15583058.2016.1230657>.
- [6] Lakušić S, Ahac M. Vibracije od željezničkog prometa. Gospodarenje prometnom infrastrukturom, 2009, p. 373–418.
- [7] Lakušić S, Haladin I, Vranešić K. Railway infrastructure in earthquake affected areas. Gradjevinar 2020;72:905–21. <https://doi.org/10.14256/JCE.2967.2020>.
- [8] Lakušić S, Haladin I, Ivančev M, Burnać K. Monitoring of vibrations on the buildings near the tram railway. Zagreb: 2022.
- [9] HRN DIN 4150-3:2016 Vibrations in Buildings—Part 3: Effects on structures 2020.





## Obračun razlika u cijeni – do sada stečena iskustva

Autor:  
**Prof.dr.sc. Ivica Završki**

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb

## Obračun razlika u cijeni – do sada stečena iskustva

Ivica Završki

### Sažetak

U radu se iznose iskustva stečena u okolnostima pojave naglog porasta cijena resursa gradnje uzrokovanih pandemijom COVID 19 i ratom u Ukrajini. Opisuje se pojam razlika u cijeni građevinskih radova te kontekst donošenja Zaključka Vlade RH za ublažavanu poremećaja na tržištima građevinskih materijala i proizvoda. Analizira se položaj struke u odnosu na navedeni pravni instrument te odnos struke sa pravnim okruženjem općenito. Komentira se važnost raspolažanja s pouzdanim podacima te analiziraju njihovi potencijalni izvori. Konačno, se u radu identificiraju generalno prisutne mogućnosti za unaprjeđenja unutar struke a koje se i u analiziranoj situaciji pokazuju ključnim.

*Ključne riječi:* građevinarstvo, obračun razlika u cijeni, iskustva

### Calculation of price differences - experience gained so far

#### Abstract

The paper presents the experiences gained in the circumstances of the sudden increase in the prices of construction resources caused by the COVID 19 pandemic and the war in Ukraine. The concept of difference in the price of construction works and the context of the adoption of the Conclusion of the Government of the Republic of Croatia for mitigating disturbances in the markets of construction materials and products are described. The position of the profession in relation to the mentioned legal instrument and the relationship of the profession with the legal environment in general is analyzed. The importance of having reliable data is commented on and their potential sources are analyzed. Finally, the paper identifies the generally present possibilities for improvements within the profession, which also prove to be crucial in the analyzed situation.

*Key words:* construction industry, calculation of price differences, experience

## 1 Uvod

Obračun razlika u cijeni građevinskih radova uslijed izmijenjenih okolnosti, ima svoje posebno značenje u periodima intenzivnih promjena u poslovnom okruženju poput onih uzrokovanih inflacijom, okolnostima snažnog porasta pojedinih cijena odnosno većine cijena u kategorijama rada materijala i korištenja strojeva u građevinarstvu. Kroz dulje razdoblje izostanka navedenih okolnosti u Republici Hrvatskoj, praksa obračuna razlike u cijeni bila je veoma rijetka. U zgradarstvu vjerojatno nije bila uopće prisutna, a donekle relevantna je bila jedino u kontekstu dugotrajnih projekata izgradnje cestovne infrastrukture. U takvim okolnostima smo kako u teoriji tako i u stručnoj praksi izgubili fokus sa metoda obračuna te konteksta i kriterija njihove primjene.

U drugoj polovini 2020. godine uslijed pandemije COVID 19 nastupile su okolnosti poremećaja u lancima opskrbe građevinskim materijalima što je dovelo do prvih značajnijih promjena u cijenama resursa u procesu gradnje. Ubrzo su uslijedio rat u Ukrajini te uz njega vezan rast cijena energetika i daljnji rast cijena građevinskih materijala. Sve navedeno nadovezalo se je na već prije prisutan nedostatak radne snage i povećanje vrijednosti rada.

Navedene okolnosti potakle su sve sudionike u procesu gradnje, a osobito iz redova izvođača i investitora na preispitivanje svojih aktualnih ugovora i prisutne regulative kako bi pokušali iznacići način za opstanak korekcije cijena te nastavak realizacije započetih projekata. Ubrzo se je ispostavilo da jednostavnih, jednoznačnih i brzih odgovora na nastale probleme nema, nego dapače, da su stajališta i interpretacija situacije i mogućnosti za njezino rješenje pojedinih bitnih društvenih dionika koji čine kontekst građevinske privrede različiti. Navedimo samo potpuno različite i kontroverzne interpretacije teksta Zakona o obveznim odnosima i uz njega nedjeljivog Zakona o javnoj nabavi, od strane pojedinih ministarstava s jedne strane i pripadnika pravne struke s druge, zatim pitanja o načinu gledanja na problem tijela za provedbu financiranja projekata sredstvima Europske Unije te konačno gledanje i očekivanje građevinske struke.

## 2 Pozicija struke

Građevinska struka je u zadnjih desetak godina pokazala značajan stupanj sposobnosti za samooorganizaciju u situacijama koje su to zahtijevale. Spomenimo organizaciju otklanjanja posljedica poplave u Gunji od 2014. godine, zatim sudjelovanje struke u donošenju zakona uz sudjelovanje predstavnika društvenih dionika i to Zakona o poslovima i djelatnostima u prostornom uređenju i gradnji NN 78/15 i Zakona o komorama arhitekata i inženjera u graditeljstvu 78/15, te konačno organizaciju aktivnosti struke u periodu nakon potresa od 22. ožujka te 28. i 29. prosinca 2020. godine su na području grada Zagreba, Zagrebačke, Krapinsko zagorske te Sisačko - moslavačke županije.

Na sličan način struka je po postojećim tijelima interesnih udruženja, državne uprave te institucijama i pojedincima, potaknula događanja i u slučaju porasta cijena resursa, što je rezultiralo donošenjem Zaključka o postupanju radi ublažavanja posljedica poremećaja cijena građevinskih materijala i proizvoda, NN 107/21 od 30. rujna 2021. i potom

Zaključkom Vlade Republike Hrvatske o ublažavanu poremećaja na tržišta građevinskih materijala i proizvoda NN 71/2022 od 21. lipnja 2022.

Navedene inicijative imale su za cilj iznalaženje mogućnosti za u nastalim okolnostima primjerenu naknadu troškova izvođačima, kroz što bi se omogućio nastavak započetih projekata bez raskida i posljedičnih prolongacija rokova te samim tim uzrokovano još značajnijeg povećanja cijena. Takva inicijativa dakle, osim za građevinski sektor ima veliki značaj i za javne investitore.

U većini ozbiljnih svjetskih praksi je pozicija građevinskog sektora za ukupni privredni sustav toliko važan da se njegovoj održivosti i stabilnosti posvećuje poseban značaj. Određena sinergija koja je pokazana u procesu razvoja i usvajanja metodologije obračuna razlike u cjeni građevinskih radova jedan je od primjera prakse kakva bi i u Republici Hrvatskoj trebala biti sustavno prisutna. Sve navedeno nikako ne bi trebalo mijesati sa pojmovima pogodovanja ili narušavanja principa slobodne tržišne utakmice.

### **3 Primjereni izvori podataka**

Već nakon donošenja prvog Zaključka Vlade, i analiza mogućnosti za njezinu implementaciju, moglo se je konstatirati da indeksi kretanja cijena prikupljenih i izražavanih od strane Državnog zavoda za statistiku nisu primjereni. Problem je u tome što materijali koji se u pojedinim značajnim kategorijama projekata pojavljuju u visokom udjelu, u statistikama Zavoda nisu posebno iskazani, nego su uprosječeni s čitavim nizom drugih po pojedini konkretan projekt potpuno nebitnih stavaka odnosno jediničnih cijena. Kod pokušaja primjene klizne skale koja bi se temeljila na takvim indeksima, rezultati bi bili potpuno nerealni. Intuitivno razmišljanje u smjeru korekcije metodologije iskazivanja podataka pokazalo se je potpuno nerealno, jer je sustav nacionalne statistike u potpunosti i na obvezujući način usklađen sa Eurostatom. Rješenje je pronađeno u sustavu prikupljanja podataka o tržišnim cijenama pojedinih materijala od strane Hrvatske gospodarske komore koji do sada funkcioniра uspješno.

Ingerencije u pogledu upravljanja građevinskim sektorom su podijeljene i to između Ministarstva prostornoga uređenja, graditeljstva i državne imovine s jedne strane, čija se praksa odnosi na normativni i regulatorni dio te Ministarstva gospodarstva s druge, u čijoj bi nadležnosti trebao biti razvoj sektora u ekonomskom smislu. Ono za što međutim mnogi smatraju da nedostaje, je jasna točka prikupljanja znanja i podataka te provedbe analiza za potrebe upravljanja sektorom. Pozadina primjedbe vjerojatno dijelom leži u mentalnom naslijedu iz prošlosti u kojoj su takvi sustavi bili organizirani, centralizirani i dugoročno održavani za obnašanje pretpostavljene svrhe. U današnjoj situaciji, kada takva jedinstvena točka već dugo ne postoji, rješenje treba tražiti u disperziranom i efikasnem sustavu unutar kojeg svaki od sudionika doprinosi u području svoje ekspertize i generalnog područja djelovanja na dohodovnoj osnovi.

## 4 Pravni okvir

Pravni okvir relevantan za građevinsku privredu i struku sastoji se iz dva bitna dijela, jedan koji se odnosi na građevinsku tehničku regulativu i drugi koji se odnosi na opću zakonsku regulativu. Kao stručnjaci smo svakako obvezni poznavati tehničku regulativu te smo pozvani sudjelovati u postupcima njezinog donošenja. Ovdje se radi o Zakonu o gradnji i srodnim zakonima te svim podzakonskim aktima koji iz njih slijede.

U slučaju pak obračuna razlika u cijeni, kao najvažnija se je pokazala opća zakonska regulativa, a prvenstveno ona vezana uz Zakon o obveznim odnosima i Zakon o javnoj nabavi. Pozicija građevinske struke sasvim načelno ne omogućava naše meritorno uključivanje u interpretaciju zakonskog teksta nego u tom pogledu gotovo u potpunosti ovisimo o stručnjacima pravne struke. Otegotnu okolnost predstavlja specifičnost svakog ugovornog odnosa koji kao takav zahtijeva potpuno poseban pristup a unutar kojeg je i nadalje zadržan element arbitrarnosti koji može biti prisutan i do samog potencijalnog okončanja sudskog spora koji bi unutar njega mogao nastati.

Velik broj formulacija u Zakonu o obveznim odnosima u dijelu koji se odnosi na ugovore o građenju i članke 620. do 632. i nadalje su i uz donesen Zaključak Vlade RH ostale neprecizne i nejasne, i to kako profesionalcima građevinske struke tako u određenim aspektima i samim pravnicima. Dodatno, nije začuđujuće da pojedini pojmovi unutar građevinske struke pravnicima predstavljaju potpunu nepoznаницу što sve zajedno čini ukupan problem u interpretaciji pravnog konteksta pojedinih situacija.

U navedenim okolnostima izuzetno je bitno imati aktivan pristup struke donositeljima regulative u za nju bitnim aspektima, organizirano preko predstavnika društvenih dionicika kroz partnerski odnos sudjelovati u procesima donošenja zakona te njihovih izmjena i dopuna. To je interes građevinske struke, privrede ali i donositelja i treba biti omogućen temeljem Općih načela i minimalnih standarda savjetovanja Europske komisije sa zainteresiranim dionicima, odnosno Smjernica Vlade RH za primjenu kodeksa savjetovanja sa zainteresiranom javnošću u postupcima donošenja zakona, drugih propisa i akata.

Jedan od primjera izostanka gore opisanog partnerstva u pogledu donošenja regulativе sadržan je upravo u odredbama članaka 626. i 627. Zakona o obveznim odnosima koji regulira mehanizam obračuna razlika u cijeni građevinskih radova. Interpretacija navedenog teksta unutar koje bi izvođač radova trebao preuzeti rizike vezane uz promjenu cijene za 2,5 odnosno 10 postotaka ukupne vrijednosti radova predstavlja veliko finansijsko opterećenje koje izvođač radova mora prebaciti na naručitelja, što u krajnjoj posljedici generira povećanje cijena građevinskih radova uzrokovan izloženosti nepotrebnom riziku.

## 5 Potrebe za unaprjeđenjima unutar struke

Pitanje metoda obračuna razlika u cijenama građevinskih radova treba nas osim svega ponovo vratiti do tema koje su već dugo prisutne unutar struke i to svih dionika, projektanata, izvođača radova, stručnog nadzora te svakako i investitora, a posljedično sudskih vještaka i sudova. Radi se nedostatku standardnih i konsenzualno prihvaćenih normativnih radova u građevinarstvu. Pod tim zbirnim nazivom podrazumijevaju se standardizirane troškovničke stavke sa jasnom strukturom opisa i definicijom sadržaja, pripadajućim tehničkim uvjetima, istaknutim metodama izmjere te izraženim normativima utrošaka resursa dakle rada, materijala i strojeva koji sudjeluju u ostvarenju pojedine troškovničke stavke odnosno aktivnosti.

Sve navedeno u svakodnevnoj stručnoj praksi predstavlja osnovu za izmjjeru količina izvedenih radova, i izračun njihove vrijednosti te posebno osnovu za izradu analize cijena i obračun vanstroškovničkih radova. U svakoj od metoda za obračun razlika u cijeni izražena je potreba za primjenu upravo sveg prethodno navedenog a u čijem izostanku smo prepуšteni primjeni nestandardiziranih postupaka koji se usvajaju unutar integriteta i kompromisa pojedinih sudionika u procesu grdnje.

Pristup ozbiljnog razvoju navedenih elemenata neophodnih za svakodnevno odvijanje poslovnih aktivnosti u građevinarstvu je prvi korak u uspostavi jasnih, profesionalnih i dobro izbalansiranih odnosa između investitora i izvođača radova pa tako i u kontekstu obračuna razlika u cijeni izvedenih radova.

## 6 Zaključak

Ukupno je moguće zaključiti da je građevinska struke u okolnostima poremećaja na tržištu izazvanog naglim porastom cijena resursa pokazala značajnu reaktivnost i kapacitet zalaganja za popravak stanja. U buduće bi bilo još i povoljnije ako bi se aktivnosti poduzimale proaktivno, u smislu prevencije i anticipacije nepoželjnih situacija. To je moguće kroz snaženje društvene pozicije građevinarstva i građevinske struke kroz razvoj obrazovnih, profesionalnih, stručnih i interesnih dionika te njihovog kompetentnog, na znanju utemeljenog aktivnog odnosa sa okruženjem, drugim strukama, nadležnim ministarstvima te društvom u cjelini.

## Literatura

- [1] Zakon o obveznim odnosima NN 35/05, 41/08, 125/11, 78/15, 29/18, 126/21
- [2] Zakon o javnoj nabavi NN 120/16, 114/22
- [3] Bezak, S.: Struktura promjene cijene građevinskih radova, Građevinar, 55 (2003) 8.
- [4] Milotić, I.: Indeksna klauzula, klizna skala i promjena cijene kod ugovora o građenju, Pravo i porezi – 9.2021.
- [5] Republika Hrvatska, Ministarstvo mora, prometa i infrastrukture: Mišljenje vezano uz porast cijena građevinskih radova i primjenu članka 627 ZOO te ZJN na postojeće ugovore o javnoj nabavi i izrada Metodologije priznanja razlike u cijeni na temelju ugovora o građenju u slučajevima porasta cijena pojedinih građevinskih materijala i proizvoda, 03.2022.



## Obrada građevnog otpada nastalog djelovanjem potresa

Autor:  
Prof.dr.sc. Nina Štirmer

Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet

## Obrada građevnog otpada nastalog djelovanjem potresa

Nina Štirmser

### Sažetak

Postupanje s građevnim otpadom nastalim djelovanjem potresa predstavlja veliki organizacijski, tehnički i finansijski izazov. Upravljanje otpadom započinje njegovim hitnim uklanjanjem kako bi se osigurala pomoć lokalnom stanovništvu te pristup do oštećenih građevina. Ovisno o geografskim značajkama i naseljenosti pogodjenog područja, otpad se privremeno skladišti ili odvozi na odlagališta i reciklažna dvorišta kako bi se kasnije obradio i upotrijebio za različite namjene. U radu su prikazana iskustva različitih zemalja u gospodarenju građevnim otpadom nastalim djelovanjem potresa, sastav građevnog otpada te mogućnosti njegove obrade, kao i zahtjevi za reciklirane agregate prema europskim normama i preporukama iz postojećih istraživanja.

**Ključne riječi:** građevni otpad, potres, recikliranje, reciklirani agregat, beton s recikliranim agregatom

## Processing of earthquake-induced demolition waste

### Abstract

Managing earthquake-induced demolition waste is a major organizational, technical, and financial challenge. Waste management begins with the immediate removal of waste to help the local population and allow access to damaged buildings. Depending on the geographic location and population density of the affected area, the waste is sent to landfills or temporarily stored for later processing and use for different purposes. The paper presents the experience of different countries in the management of demolition waste caused by earthquakes, the composition of the waste and the possibilities of processing it, and the requirements for recycled aggregates according to European standards and recommendations from existing studies.

**Key words:** demolition waste, earthquake, recycling, recycled aggregate, recycled aggregate concrete

## 1 Uvod

Jedna od posljedica djelovanja potresa nastanak je ogromnih količina građevnog otpada, pretežno miješanog kojeg treba prikupiti, privremeno odložiti te po mogućnosti ponovno upotrijebiti ili reciklirati (slika 1). Istraživanja su pokazala da se 80 – 90 % građevnog otpada nastalog rušenjem građevina može uspješno reciklirati [1-4]. Ipak, sastav otpada nakon djelovanja potresa razlikuje se od uobičajenog sastava građevnog otpada, jer može sadržavati različita onečišćenja koja predstavljaju rizik za zdravlje ljudi i okoliš. Postupanje s građevnim otpadom počinje odmah nakon djelovanja potresa i nastavlja se tijekom dugoročne obnove. Prva faza obično je vezana uz trenutačnu pomoć pogodjenom stanovništvu i usmjerena je na uklanjanje otpada s pristupnih ruta dok se druga faza odnosi na dugoročno upravljanje otpadom što uključuje i njegovu obradu te moguću upotrebu tijekom obnove pogodjenog područja ili za druge namjene.

Prema podacima Ministarstva gospodarstva i održivog razvoja Republike Hrvatske [5], ukupna količina otpada koji se može dovesti u vezu sa zagrebačkim potresom koji se dogodio u ožujku 2020. godine, procijenjena je na oko 50.000 t. Otpad je odvezen na lokaciju podružnice Zagrebačkih cesta – Reciklaža građevnog otpada, koji bilježi veliko povećanje zaprimljene količine šute (ključni broj 17 01 07). Velike količine na kraju 2020. godine ostale su neobrađene i uskladištene na toj lokaciji. Za obradu materijala nastalog djelovanjem potresa na području Sisačko – moslavačke županije uspostavljena su privremena skladišta Mala Gorica (Petrinja), Kemokop d.o.o. (Sisak) i Majski Trnik (Glina) na koja se dovozio inertni materijal (mješavina – beton cigla, crijev, kamen) koji nije proglašen otpadom, a obrađuje se mobilnim uređajem na nekoliko frakcija te se dalje koristi za nasipavanje putova ili kao sirovina (pri čemu su izdvojeni metal i drvo). Prema privremenim podacima o gospodarenju građevnim otpadom u 2021. godini [6], na navedene lokacije u Sisačko-moslavačkoj županiji dovezeno je približno 248.000 tona materijala nastalog od posljedica potresa, uključujući i naknadna rušenja oštećenih objekata za potrebe obnove. Dodatno je još do lipnja 2022. godine dovezeno približno 33.000 tona materijala. Obradom mobilnim uređajem, od toga je izdano na daljnje korištenje ukupno 71.500 tona materijala, a 53.520 tona iskorišteno je za potrebe uređenja samih lokacija.

Prema Okvirnoj direktivi o otpadu [7], određeni otpad prestaje biti otpad ako je povrgnut postupcima uporabe, uključujući recikliranje, i ako zadovoljava posebne kriterije utvrđene u skladu sa sljedećim uvjetima:

- tvar ili predmet uobičajeno se koriste za posebne namjene
- za takvu stvar ili predmet postoji tržiste i potražnja
- tvar ili predmet ispunjavaju tehničke zahtjeve za posebne namjene i zadovoljavaju postojeće propise i norme koje važe za proizvode; i
- uporaba tvari ili predmeta neće dovesti do ukupnih štetnih učinaka na okoliš ili zdravlje ljudi.

Prema Zakonu o gospodarenju otpadom (NN 84/21) [8], građevni otpad je otpad koji nastao aktivnostima građenja i rušenja, a reciklažno dvorište za građevni otpad je građevina namijenjena razvrstavanju, mehaničkoj obradi i privremenom skladištenju građev-

nog otpada. Navedeni zakon također propisuje da se najmanje 70 % mase neopasnog građevnog otpada, osim materijala iz prirode određenog ključnim brojem otpada 17 05 04 – zemlja i kamenje koji nisu navedeni pod 17 05 03, mora uporabiti recikliranjem, pripremom za ponovnu uporabu i drugim postupcima materijalne uporabe, uključujući postupak nasipavanja, kod kojih se otpad koristi kao zamjena za druge materijale. Prema Pravilniku o katalogu otpada (NN 90/15) [9], građevinski otpad i otpad od rušenja objekata (uključujući iskopanu zemlju s onečišćenih lokacija) svrstava se u grupu 17 te se pripadajuće vrste građevnog otpada označavaju šesteroznamenkastim ključnim brojevima. U slučaju opasnog otpada, ključnom broju pridružuje se znak \*.



Slika 1. Građevni otpad nastao djelovanjem potresa u Zagrebu

Prema Pravilniku o građevnom otpadu i otpadu koji sadrži azbest (NN 69/16) [10], posjednik neopasnog mineralnog građevnog otpada iz Priloga IV. ovoga Pravilnika (tablica 1) dužan je s istim postupati na način da se osigura odgovarajuća uporaba takvoga otpada, sukladno Zakonu, te u mjeri u kojoj je to izvedivo omogući pripremu za ponovnu uporabu i ukidanje statusa otpada sukladno posebnom propisu koji uređuje ukidanje statusa otpada.

**Tablica 1. Popis neopasnog mineralnog građevnog otpada [10]**

| Ključni broj | Naziv otpada  |
|--------------|---|
| 17 01 01     | beton   |
| 17 01 02     | opeka   |
| 17 01 03     | crijep/pločice i keramika   |
| 17 01 07     | mješavine betona, cigle, crijepe/pločica i keramike koje nisu navedene pod 17 01 06*                        |
| 17 02 02     | staklo  |
| 17 05 04     | zemlja i kamenje koji nisu navedeni pod 17 05 03  |
| 17 05 06     | iskopana zemlja koja nije navedena pod 17 05 05   |
| 17 05 08     | kamen tučenac za nasipavanje pruge koji nije naveden pod 17 05 07*  |
| 17 08 02     | građevinski materijali na bazi gipsa koji nisu navedeni pod 17 08 01*                                       |
| 17 09 04     | miješani građevni otpad i otpad od rušenja objekata, koji nije naveden pod 17 09 01*, 17 09 02* i 17 09 03* |
| 19 12 05     | staklo – ako je nastalo obradom građevnog otpada  |
| 19 12 09     | minerali (npr. pjesak, kamenje) – ako su nastali obradom građevnog otpada                                   |

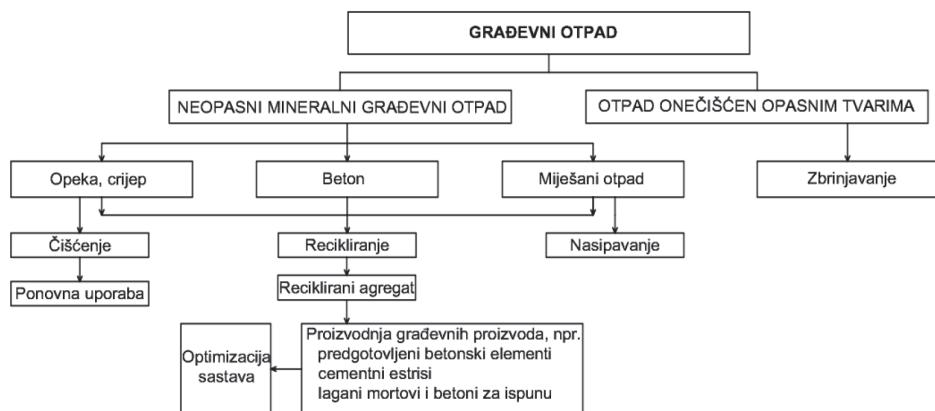
## 2 Mogućnosti primjene građevnog otpada

Nakon seizmičkih događaja potrebno je ukloniti građevni otpad i zgrade ili dijelove zgrada nesigurne za korištenje te provoditi obnovu. Uz nastanak velikih količina građevnog otpada, neminovno se povećava potreba za svim građevinskim materijalima koji se pritom koriste u rekonstrukciji zgrada, ali i popravcima oštećenih infrastrukturnih građevina, kao što su ceste, željeznice, nasipi, mostovi i sl. Recikliranjem se dio nastalog građevnog otpada može iskoristiti te tako smanjiti potrošnju materijala iz prirodnih resursa. Nasipavanje je jedan od načina ponovne uporabe neopasnog građevnog otpada, ali ono treba biti posljednje rješenje kojem će se pribjeći [11]. Prije toga treba razmotriti mogućnosti ponovne uporabe i recikliranja inertnog građevnog otpada za vrjednije namjene (slika 2). Primjeri proizvoda u kojima se može primijeniti reciklirani agregat su:

- betonski opločnici za vanjsku uporabu koji služe za popločivanje ulica i pješačkih površina
- betonski rubnjaci za vanjsku uporabu koji služe za odvajanje površina iste ili različite ravnine
- betonske kanalice za vanjsku uporabu koje služe odvodnji oborinskih voda prema slivnim cima i kanalizacijskim sabirnicima
- cementni estrisi
- lagani betoni i mortovi za ispunu.

Nakon recikliranja također preostane dio «nekorisnog materijala» koji se eventualno može primijeniti za nasipavanje terena planiranih za izravnavanje i oblikovanje, zatim za izvedbu podloga cesta, a posebice poljskih putova te za izradu nasipa radi zaštite naselja od buke kod nekih prometnica. Takvi «nekorisni materijali» odnose se na materijale koji

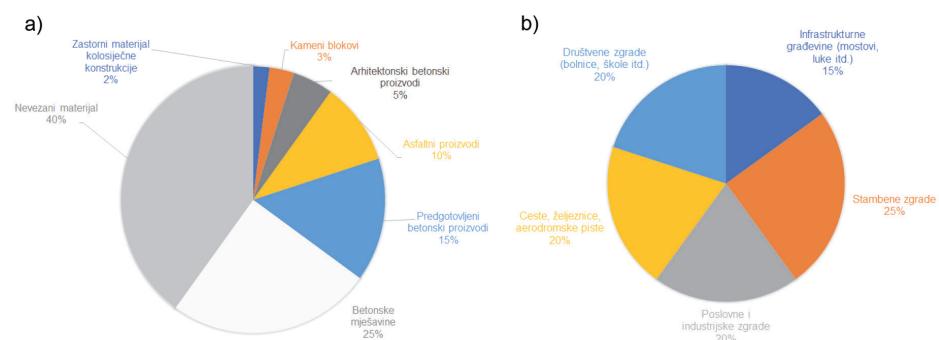
nisu opasni za okoliš pri trajnom odlaganju, odnosno materijali čija daljnja prerada ne daje sirovinu za prerađevine veće upotreбne vrijednosti.



Slika 2. Postupanje s građevnim otpadom nastalim djelovanjem potresa

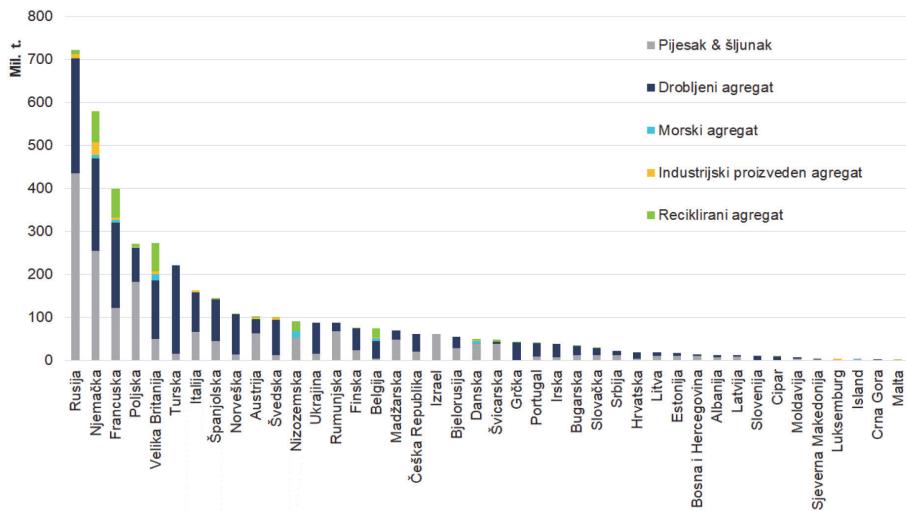
## 2.1 Proizvodnja agregata

Prema podacima Europskog udruženja za aggregate, UEPG [12], u Europskoj uniji proizvodi se 3 milijarde tona aggregate godišnje što čini 6 tona po stanovniku. Ako se uzme u obzir broj lokacija i tvrtki te broj zaposlenih i masa proizvedenog materijala, sektor proizvodnje aggregate najveći je među industrijama koje crpe prirodne resurse, izuzevši resurse za proizvodnju energije. U Europskoj uniji, industrija aggregate zapošljava 187.000 ljudi na 26.000 lokacija. Aggregate se koriste za nasipavanja te proizvodnju asfalta, betona, mortova i žbuka (slika 3). Svaka njegova namjena zahtijeva postizanje određenih fizikalnih i mehaničkih svojstava te svojstava trajnosti.



Slika 3. Upotreba aggregate, a) prema vrsti građevnih proizvoda, b) prema namjeni građevina, izvor podataka: [12]

Proizvodnja aggregate u 2019. godini u pojedinim zemljama Europe prikazana je na slici 4.



Slika 4. Proizvodnja agregata u 2019. godini, izvor podataka: [12]

Dijagram prikazuje podatke za 42 zemlje koje su proizvele ukupno 4,20 milijardi tona agregata što čini 9,3 % svjetske proizvodnje od 45 milijardi tona. U Aziji se primjerice proizvodi 70 % ukupnih količina agregata. Unutar Europske unije, najveći su proizvođači Njemačka, Francuska i Pojska dok je u Hrvatskoj proizvedeno 19 milijuna tona, od čega 77 % drobljenog agregata. Na razini svih promatranih zemalja, proizvodi se približno 40 % pijeska i šljunka, 47 % drobljenog agregata, 9 % recikliranog te 4 % morskog i industrijski proizvedenog agregata. Zemlje koje proizvode najviše recikliranog agregata su Belgija, Nizozemska, Velika Britanija, Francuska i Njemačka.

## 2.2 Zahtjevi za agregat

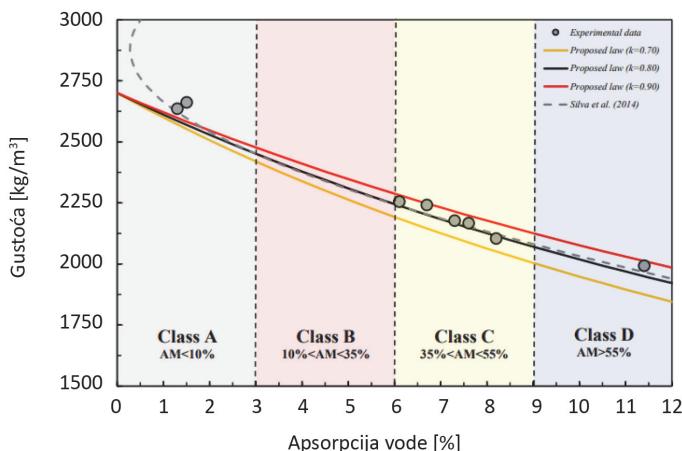
Reciklirani betonski agregat (slika 5) ima tri glavna obilježja koja ga razlikuju od prirodnog agregata [13]:

- priljepljeni mort staroga betona (engl. adhered mortar, AM)
- različite organske i anorganske tvari koje se ne mogu u potpunosti ukloniti
- veći udio sitnih čestica koji je posljedica procesa recikliranja.

Slika 6 prikazuje predloženu podjelu krupnog betonskog recikliranog agregata obzirom na udio morta od staroga betona (AM).



Slika 5. Reciklirani betonski agregat



Slika 6. Predložena podjela krupnog recikliranog agregata ovisno u udjelu priljepljenog morta, AM [13]

Reciklirani agregati mogu imati veći udio sulfata topivih u vodi koji su potencijalno reaktivni i utječu na povećanje ekspanzivnih reakcija u betonu. Izvori sulfata uključuju cement u starom mortu i gipsanu žbuku. Stoga većina normi za primjenu recikliranog agregata u betonu ograničava sadržaj sulfata topivih u vodi ili kiselini. Kloridi također mogu onečistiti reciklirani agregat. Naime, kloridi u originalnom betonu potječe iz vanjskih izvora ako je reciklirani agregat dobiven rušenjem dijelova konstrukcija koji su bili u kontaktu s morskom vodom ili solima za odmrzavanje. Kloridi također mogu biti posljedica primjene nekih kemijskih dodataka kao što su ubrzivači. Prema tome, norme također ograničavaju udio klorida u recikliranom agregatu kako ne bi prouzročili koroziju armature u novom betonu. Reciklirani agregat također može sadržavati druge nečistoće kao što su glinovite čestice koje u betonu sprječavaju dobar kontakt između cementnog kamena i agregata. U recikliranom agregatu potrebno je ograničiti i udio laganih čestica i organskih tvari. Prema pojedinim istraživanjima, male količine čelika u recikliranom agregatu nisu utjecale na tlačnu čvrstoću i modul elastičnosti, ali mogu prouzročiti mrlje

hrđe. Za razliku od čelika, aluminij se ne može odvojiti magnetnim separatorom. Reakcija aluminija s kalcijevim hidroksidom u vodenoj otopini proizvodi vodik, pa stoga kemij-ska reakcija između aluminija u recikliranom agregatu i alkalnog betona može generirati vodikov plin. Nakon očvršćivanja betona u kojem je korišten reciklirani agregat s većim udjelom nečistoća u obliku aluminija, može doći do pojave pukotina te smanjenja tlačne čvrstoće betona. Norme koje pokrivaju područje primjene agregata su:

- HRN EN 12620:2008 Agregati za beton [14]
- HRN EN 13139:2003 i HRN EN 13139:2003/AC:2006 Agregati za mort [15]
- HRN EN 771-3:2015 Specifikacije za zidne elemente – 3. dio: Betonski zidni elementi (gusti i lagani agregat) [16]
- HRN EN 13043:2003 i HRN EN 13043:2003/AC:2006 Agregati za bitumenske mješavine i površinsku obradu cesta, aerodromskih pista i drugih prometnih površina [17]
- HRN EN 13242:2008 Agregati za nevezane i hidraulički vezane materijale za uporabu u građevinarstvu i cestogradnji [18].

Norma HRN EN 12620 specificira zahtjeve za primjenu agregata u betonu te obuhvaća i reciklirane aggregate gustoća između 1500 i 2000 kg/m<sup>3</sup>, kao i sitni reciklirani agregat (D<sub>max</sub> = 4 mm). Prema ovoj normi, reciklirani agregat definira se kao agregat nastao obradom anorganskog materijala prethodno korištenog u građenju. Norma daje sljedeću podjelu krupnog recikliranog agregata za primjenu u betonu:

- R<sub>c</sub>: beton, proizvodi od betona, mort; betonski zidni elementi
- R<sub>u</sub>: nevezani agregat, prirodno kamen; hidraulički vezan agregat
- R<sub>b</sub>: keramički zidni elementi (npr. opeka i pločice); kalcij silikatni zidni elementi; aerirani beton
- R<sub>a</sub>: materijali na bazi bitumena
- F<sub>L</sub>: plutajući materijali
- X: ostali materijali:
  - kohezivni (npr. glina i zemlja)
  - metali (koji sadrže i koji ne sadrže željezo)
  - drvo koje ne pluta; plastika, guma
  - gipsana žbuka
  - R<sub>g</sub> – staklo.

Postupci ulazne kontrole za recikliranje trebaju identificirati vrstu materijala, mjesto nastanka te dobavljača. Za primjenu u betonu potrebno je osim uobičajenih svojstava agregata ispitati i svojstva prikazana u tablici 2.

**Tablica 2. Metode ispitivanja recikliranog agregata za primjenu u betonu**

| <b>Svojstva</b>  | <b>Norma</b>  |
|--|---------------|
| Udio sastojaka krupnoga recikliranog agregata                            | HRN EN 933-11 |
| Gustoća i apsorpcija   | HRN EN 1097-6 |
| Sadržaj kloridnih iona topivih u kiselini                                | HRN EN 1744-5 |
| Sadržaj sulfata topivih u vodi   | HRN EN 1744-1 |
| Utjecaj tvari topivih u vodi na početak vremena vezivanja cementne paste | HRN EN 1744-6 |
| Prisustvo organske tvari   | HRN EN 1744-1 |

Norma HRN EN 13139 specificira svojstva agregata i punila za proizvodnju mortova, a odnosi se i na reciklirane aggregate nastale obradom anorganskog materijala prethodno korištenog u građenju. Bitne značajke agregata za primjenu u proizvodnji mortova, uključujući i reciklirane aggregate su:

- oblik i veličina zrna, gustoća
- čistoća (udio školjki, udio sitnih čestica)
- sastav (kloridi, sulfati topivi u kiselini, ukupni sumpor, tvari koje usporavaju vezivanje i očvršćivanje)
- volumenska stabilnost (tvari topive u vodi)
- apsorpcija vode
- opasne tvari (radioaktivnost, izluživanje teških metala i drugih tvari)
- otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja
- alkalno-silikatna reakcija.

Norma HRN EN 13043 koja s odnosi na aggregate za bitumenske mješavine i površinsku obradu cesta, aerodromskih pista i drugih prometnih površina također obuhvaća reciklirane aggregate te navodi sljedeće bitne značajke svih vrsta agregata:

- oblik i veličina zrna, gustoća
- čistoća (kvaliteta sitnih čestica)
- postotak oštećene površine krupnog agregata
- prikladnost krupnog agregata za bitumenska veziva
- otpornost na drobljenje krupnog agregata
- otpornost na zaglađivanje, abraziju, habanje
- otpornost na toplinski šok
- volumenska stabilnost
- kemijski sastav
- opasne tvari (radioaktivnost, izluživanje teških metala i drugih tvari)
- otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja.

Iz svega navedenog, vidljivo je da norme omogućavaju primjenu recikliranog agregata, ali često izjednačavaju svojstva recikliranog sa svojstvima prirodnog agregata. Nije za očekivati da reciklirani agregat u potpunosti zamjeni prirodni, ali se u određenom postotku može primijeniti u proizvodnji betonskih i asfaltnih mješavina te mortova, uz

analizu svojstava i optimiziranje sastava građevnih proizvoda. Ipak, norma za beton, HRN EN 206:2021 [19], detaljnije specificira primjenu recikliranog agregata te razlikuje pojmove recikliranog agregata, "povratnog" drobljenog agregata (engl. reclaimed crushed aggregate) te povratnog pranog agregata (engl. reclaimed washed aggregate). Povratni drobljeni agregat nastaje drobljenjem očvrstnog betona koji nije bio korišten u građevinama dok reciklirani agregat nastaje obradom materijala ranije korištenog u građevinama. Povratni drobljeni agregat može se primjerice dobiti drobljenjem očvrstnog otpadnog betona nastalog u proizvodnji ili pri ugradnji ili nakon kontrolnih ispitivanja betonskih uzoraka. Povratni prani agregat dobiva se pranjem svježeg betona. Normom je navedeno da povratni agregat proizvođači mogu koristiti interno i to u količino do 5 % mase ukupnog agregata bez dijeljenja u frakcije, a ako se želi koristiti veće udjele, tada ga treba podijeliti na sitni i krupni agregat u skladu s normom HRN EN 12620 te ga tretirati kao reciklirani agregat. Preporuke za primjenu krupnog recikliranog agregata ( $d \geq 4 \text{ mm}$ ) u betonu dane su u Prilogu E norme HRN EN 206 (tablica 3).

**Tablica 3. Najveći postotak zamjene krupnog agregata (maseni %) prema normi HRN EN 206**

| Vrsta recikliranog agregata                                   | Razred izloženosti |             |                            |                                  |
|---|--------------------|-------------|----------------------------|----------------------------------|
|   | X0                 | XC1,<br>XC2 | XC3, XC4, XF1, XA1,<br>XD1 | Svi drugi razredi<br>izloženosti |
| Tip A:<br>$R_{C90}, R_{Cu95}, R_{b10}, R_{a1}, FL_2, X_{Rg1}$ | 50 %               | 30 %        | 30 %                       | 0 %                              |
| Tip B:<br>$R_{C50}, R_{Cu70}, R_{b30}, R_{a5}, FL_2, X_{Rg2}$ | 50 %               | 20 %        | 0 %                        | 0 %                              |

Tip A recikliranog agregata iz poznatog izvora može se koristiti u razredima izloženosti za koje je projektiran originalni beton u najvećem postotku od 30 %. Tip B agregata ne bi se smjelo primjenjivati za razrede čvrstoće betona  $> C30/37$ . U normi je također navedeno da bi u slučaju primjene recikliranog agregata u betonu trebalo razmotriti potrebu ispitivanja skupljanja od sušenja, puzanja i modula elastičnosti. Također je navedeno da reciklirani agregat može utjecati na promjenu konzistencije betona u vremenu. U tablici 4 prikazane su preporuke za krupni reciklirani beton prema normi HRN EN 12620. Osim navedenih kriterija za reciklirane aggregate prema važećim europskim normama, postoji niz istraživanja, preporuka i nacionalnih normi koje propisuju zahtjeve za reciklirane aggregate kako je prikazano u tablici 5 [20].

Tablica 4. Preporuke za krupni reciklirani agregat prema HRN EN 12620

| Svojstvo <sup>a</sup>               | Tip    | Točka norme HRN EN 12620 + A1:2008 | Razred prema EN 12620   |
|-------------------------------------|--------|------------------------------------|---|
| Sadržaj sitnih čestica              | A + B  | 4.6                                | Potrebno je deklarirati razred ili vrijednost   |
| Indeks plosnatosti                  | A + B  | 4.4                                | $\leq F_{I_{50}}$ ili $\leq S_{I_{55}}$   |
| Otpornost na drobljenje             | A + B  | 5.2                                | $\leq L_{A_{50}}$ ili $\leq S_{Z_{32}}$   |
| Gustoća u suhom stanju, $\rho_{rd}$ | A<br>B | 5.5                                | $\geq 2100 \text{ kg/m}^3$<br>$\geq 1700 \text{ kg/m}^3$  |
| Apsorpcija vode                     | A + B  | 5.5                                | Potrebno je deklarirati vrijednost  |
| Komponenta <sup>b</sup>             | A<br>B | 5.8                                | $R_{C90}, R_{C_{105}}, R_{b10}, R_{a_1}, FL_{2}, X_{Rg1}$<br>$R_{C50}, R_{C_{70}}, R_{b30}, R_{a_5}, FL_{2}, X_{Rg2}$ |
| Sadržaj sulfata topivih u vodu      | A + B  | 6.3.3                              | $SS_{0,2}$  |
| Sadržaj klorida topivih u kiselini  | A + B  | 6.2                                | Potrebno je deklarirati vrijednost  |
| Utjecaj na početak vezivanja        | A + B  | 6.4.1                              | $\leq A_{40}$   |

<sup>a</sup> kategorija NR (nema zahtjeva) primjenjuje se na ostala svojstva koja nisu prikazana u ovoj tablici za koja se kategorija NR može deklarirati prema normi EN 12620

<sup>b</sup> kod posebnih primjena za koje se zahtijeva visoka kvaliteta završne površine, lebdeće materijale (FL) treba ograničiti na  $FLO_{2}$

Tablica 5. Primjeri zahtjeva za reciklirane aggregate za primjenu u betonu [20]

| Vrsta recikliranog agregata                              | Veličina        | Gustoća<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | Apsorpcija<br>vode, WA <sub>max</sub> [%] | Najveći razred<br>čvrstoće<br>betona | Najveći<br>postotak<br>zamjene |
|--|-----------------|---------------------------------|---|--------------------------------------|--------------------------------|
| <b>Preporuke RILEM-a</b>                                 |                 |                                 |   |                                      |                                |
| Tip I – agregat od ziđa (npr. rec. opeka)                | krupni          | 1500                            | 20  | C16/20                               | 100                            |
| Tip II – agregat od betona                               | krupni          | 2000                            | 10  | C50/60                               | 100                            |
| Tip III – mješavina recikliranih i prirodnih agregata    | krupni          | 2400                            | 3   | nema ograničenja                     | 100                            |
| <b>Japan</b>   |                 |                                 |   |                                      |                                |
| Reciklirani agregati visoke kvalitete                    | krupni<br>sitni | 2500<br>2500                    | 3<br>3,5                                  | C/45/55<br>C45/55                    | -<br>-                         |
| Reciklirani agregati srednje kvalitete                   | krupni<br>sitni | 2300<br>2200                    | 5<br>7                                    | -<br>-                               | -<br>-                         |
| Reciklirani agregati male kvalitete                      | krupni<br>sitni | -<br>-                          | 7<br>13                                   | -<br>-                               | -<br>-                         |
| <b>Kina</b>  |                 |                                 |   |                                      |                                |
| Razina I   |                 | 2450                            | 3   | nema ograničenja                     | 100                            |
| Razina II  |                 | 2300                            | 5   | C40/50                               | 100                            |
| Razina III   |                 | 2250                            | 8   | C25/30                               | 100                            |
| <b>Australija</b>  |                 |                                 |   |                                      |                                |
| Reciklirani agregat koji ima više od 95 % betona         | krupni          | -                               | -   | C40/50<br>C25/30                     | 30<br>100                      |
| <b>Južna Koreja</b>                                      |                 |                                 |   |                                      |                                |
| Reciklirani agregat dobiven rušenjem betonskih elemenata | krupni<br>sitni | 2500<br>2200                    | 3<br>5                                    | 27<br>21<br>21                       | 30<br>30<br>30                 |
| <b>Brazil</b>  |                 |                                 |   |                                      |                                |
| Reciklirani agregat koji ima više od 95 % betona         | krupni<br>sitni | -<br>-                          | 7<br>12                                   | nekonstrukcijski<br>(15 MPa)         | 100<br>100                     |
| Reciklirani miješani agregat                             | krupni<br>sitni | -<br>-                          | 12<br>17                                  | nekonstrukcijski<br>(15 MPa)         | 100<br>100                     |

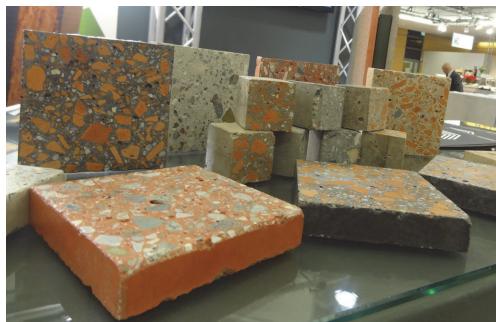
## 2.3 Svojstva betona s recikliranim agregatom

Jedan od ograničavajućih faktora za primjenu recikliranog agregata u betonu jest neu-jednačenost kvalitete i nepoznavanje vrste i količine štetnih tvari u recikliranom materi-jalu. Inače se beton s recikliranim agregatom može miješati, prevoziti, ugrađivati i zbijati na isti način kao i obični beton.

Svojstva reciklirane opeke kao agregata su velika poroznost i apsorpcija. Ovi fizikalni parametri su jako važni, jer utječu na vezu između cementne paste i agregata, na otpornost betona izloženog ciklusima smrzavanja i odmrzavanja, kao i na otpornost betona na kemijske i erozijske utjecaje. Velika poroznost i apsorpcija recikliranog agregata mogu utjecati na smanjenu obradljivost svježeg betona. Stoga se preporuča dodavanje mješavini superplastifikatora [21]. Još je jedna mogućnost potapanje reciklirane opeke prije izrade betonske mješavine. Iako je preporučeno potapanje agregata 24 sata, pojedina su istraživanja pokazala da se ona potpuno zasiti vodom već nakon 30 minuta potapanja, dok se u narednih 24 sata apsorpcija poveća za samo 2 % [22]. Opeka, kao jako porozni materijal ima i znatno manju gustoću u odnosu na prirodni agregat. Stoga će beton s agregatom od reciklirane opeke imati manju gustoću u odnosu na beton s prirodnim agregatom. Razlike u gustoći betona s recikliranim i prirodnim agregatom iznose između 8 i 17 % ovisno o udjelu recikliranog agregata [23].

Iako je općeprihvaćeno da povećanjem udjela recikliranog agregata u betonu dolazi do smanjenja tlačne čvrstoće, neka istraživanja pokazuju da je zamjenom do 30 % prirodnog agregata recikliranim, smanjenje čvrstoće neznatno te da udio recikliranog agregata u betonu ima najveći utjecaj na ranu tlačnu čvrstoću betona (3 dana) [24]. Treba uzeti u obzir da čvrstoća betona s recikliranim opekom prvenstveno ovisi o čvrstoći opeke upotrijebljene za recikliranje i o kapacitetu upijanja vode zrna recikliranog agregata [25]. Primjenom reciklirane opeke s većom početnom čvrstoćom može se postići tlačna čvrstoća betona jednakna ili čak veća od one koju dostiže beton s običnim agregatom. S recikliranim opekom velike čvrstoće mogu se proizvoditi betoni velikih čvrstoća koji će ujedno imati manju gustoću i modul elastičnosti te manju obradljivost u svježem stanju od betona s običnim agregatom. Povećanjem udjela recikliranog agregata od opeke utječe se i na smanjenje vlačne čvrstoće betona, približno 10 do 25 % [26, 27]. Ovisno o vodocementnom omjeru i udjelu reciklirane opeke, modul elastičnosti betona izrađenog s recikliranim opekom iznosi od 50 do 70 % modula elastičnosti običnog betona [22, 28]. Naime, zrna agregata od reciklirane opeke imaju 30 do 50 % manji modul elastičnosti u odnosu na prirodni agregat, ovisno o tome koristi li se sitni ili sitni i krupni reciklirani agregat u novom betonu. Veći udio sitne frakcije recikliranog agregata u betonu utječe na veće smanjenje modula elastičnosti betona [29]. Izgled uzoraka betona izrađenih s recikliranim agregatom prikazan je na slici 7.

Slika 7. Uzorci betona s recikliranim agregatom



U tablici 6 prikazani su primjeri upotrebe recikliranog agregata za različite predgotovljene betonske elemente.

**Tablica 6. Primjeri upotrebe recikliranih agregata u proizvodnji betonskih elemenata [13, 30, 31]**

| Izvor recikliranog agregata                                       | Vrsta betonskog elementa          | Uvjeti ispitivanja                  | Udio zamjene prirodnog agregata   | Glavni rezultati  | REF  |
|---|-----------------------------------|-------------------------------------|---|---|------|
| RCA iz postrojenja za recikliranje i drobljena opeka              | opločnici                         | laboratorij                         | Dvije serije 0, 25, 50 i 75 %   | Izvedivo proizvesti opločnike s 25 % drobljene opeke da bi se zadovoljio zahtjev čvrstoće   | [32] |
| RCA iz postrojenja za recikliranje i nečistoće                    | opločnici                         | laboratorij                         | Dvije serije sa 100 % RCA i 10 % ostalih nečistoća  | Dopuštena razina onečišćenja može biti najviše 10 %   | [33] |
| Reciklirano drobljeno staklo i RCA iz postrojenja za recikliranje | opločnici                         | laboratorij                         | Šest serija (dvije serije 0, 25, 50, 75 i 100 %)  | Preporučeno koristiti 50 % RCA i 50 % recikliranog drobljenog stakla s A/C omjerom 4 ili manje  | [34] |
| RCA manje kvalitete s velikim sadržajem ostalih tvari             | nekonstrukcijski betonski blokovi | laboratorij                         | Tri serije (jedna serija 0, 25, 50, 75 i 100 %)   | Moguće korištenje RCA manje kvalitete za izradu nekonstrukcijskih betonskih blokova; optimalna postotak recikliranog sitnog agregata 50 %                               | [35] |
| RCA i reciklirana opeka iz postrojenja za recikliranje            | betonski blokovi                  | laboratorij i tvornička proba       | Četiri serije, laboratorijska ispitivanja i tvornička proba   | Maksimalni udjeli zamjene krupne frakcije s RCA bili su 60 %, a sitne 20 %, a s recikliranim opekom 20 % za krupnu i 20 % za sitnu frakciju                             | [36] |
| RCA dobivene od betona čvrstoće 30 MPa                            | betonski blokovi                  | laboratorij i tvornička proba       | Dvije mješavine (0 i 75 %), laboratorijska ispitivanja i tvornička proba  | Betonski blokovi sa 75% RCA pokazuju povoljna mehanička svojstva i svojstva trajnosti i zadovoljavaju kinesku normu   | [37] |
| RCA dobiven recikliranje otpada nakon potresa i drobljena opeka   | betonski zidni elementi           | laboratorij                         | Četiri serije 0, 25, 50, 75 i 100 %   | Količina drobljene opeke treba biti manje od 25 % za krupne agregate i od 50 do 75 % za sitne aggregate   | [38] |
| RCA i reciklirana opeka   | fasadni panel ECO-SAND-WICH®      | laboratorij i tvornička proizvodnja | laboratorijska ispitivanja - šest serija (tri serije s RCA i tri serije s rec. opekom - 40, 50 i 60 %) i tvornička proizvodnja s 50 % | Sastav s 50 % RCA za unutrašnji sloj i 50 % reciklirane opeke za vanjski sloj zadovoljio je zahtjeve za primjenu u fasadnom elementu; paneli su ugrađeni u dvije zgrade | [30] |
| Drobjeni opekarски lom  | stropni blokovi                   | laboratorij                         | 50 % sitne frakcije i 75 % krupne frakcije  | Dokazano da je moguća izrada blokova ispunе za predgotovljene stropne konstrukcije povećane požarne otpornosti  | [31] |

RCA – reciklirani betonski agregat

### 3 Iskustva u gospodarenju građevnim otpadom nastalim djelovanjem potresa

U regijama pogodjenim ekstremnim prirodnim nepogodama, količine građevnog otpada nastalog u pojedinačnom događaju mogu biti pet do petnaest puta veće od uobičajenih količina građevnog otpada koji inače nastane u jednoj godini [39]. Primjerice, kao posljedica potresa koji se dogodio 2010. godine na Haitiju, nastalo je 23 do 60 milijuna tona otpada, dok je u pokrajini Sichuan u Kini 2008. godine nastalo 20 milijuna tona otpada, kao i u Kobeu u Japanu 1995. godine. Otpad koji pri tome nastaje u najvećem se dijelu sastoji od građevnog otpada, ali može sadržavati i dijelove namještaja i drugih materijala.

#### 3.1 Italija

Italija je jedna od europskih zemalja s najvećim rizikom od potresa. Gotovo 40 % Talijana živi u područjima visokog seizmičkog rizika te se 57 % općina nalazi u seizmičkim zonama 40. U nastavku se navode iskustva u gospodarenju građevnim otpadom nastalim nakon potresa u nekoliko talijanskih regija.

##### *Regija Friuli-Venezia Giulia, 1976.; 6,4 stupnja prema Richteru*

Godine 1976., talijansku regiju *Friuli-Venezia Giulia* pogodila su dva jaka potresa u kojima je stradalo 989 osoba, bez domova je ostalo 100.000 ljudi, uništeno je 18.000 stambenih jedinica, a oštećeno još njih 75.000 (slika 8). Procjenjuje se da je pri tome je nastalo približno  $189.000 \text{ m}^3$  građevnog otpada za čije je uklanjanje bila potrebna 1 godina. Naknadni potresi događali su se još sljedećih 20 mjeseci te su se poneki osjetili sve do granice sa Slovenijom. Pojedine zgrade oštećene prvim potresom kasnije su još bile dodatno oštećene naknadnim jakim potresima [1].

Za hitno upravljanje nastalom situacijom imenovan je posebni povjerenik koji je mogao poduzeti sve potrebne mjere, neovisno o zakonima koji su bili na snazi. Pogođeno stanovništvo nije rado prihvatile mogućnost izgradnje kuća u novim područjima, nego je davalo prednost rješenjima u blizini postojećih urbanih cjelina. Pozitivan primjer primjene nastalog građevnog otpada je ponovna upotreba 7650 kamenih blokova za obnovu postojeće katedrale. Mnogo je oštećenih kuća ili stambenih zgrada srušeno, umjesto da je obnovljeno što je rezultiralo nastankom ogromnih količina građevnog otpada te povećanom potrebotom za građevinskim materijalima za izgradnju novih građevina.



Slika 8. Posljedice potresa u regiji Friuli, 1976., izvori fotografije: Civici Musei Udine [41]

*Irpinia, 1980.; 6,8 stupnjeva prema Richteru*

Potresom koji se dogodio 1980. godine, pogođeno je nekoliko regija na jugozapadnom dijelu talijanskog poluotoka pri čemu je bilo 2914 žrtava, a bez domova je ostalo čak 280.000 ljudi. U ovom potresu uništeno je 70.000 stambenih jedinica, a oštećeno njih 30.000. Jedna od posljedica potresa bio je nastanak 133.000 m<sup>3</sup> građevnog otpada za čije je uklanjanje bilo potrebno čak dvije godine. Posebni povjerenik uspostavio je strukturu upravljanja na četiri razine sve do razine općina. Ovdje nisu dostupni detaljni podaci o postupanju s građevnim otpadom, ali se ističe primjer obnove staroga grada Valva u provinciji Salerno gdje su pažljivo premještani oštećeni dijelovi zgrada.

*Regija Abruzzo, 2009.; 5,8 stupnjeva prema Richteru*

U ovom potresu osobito je pogođena provincija L'Aquila. U cijeloj regiji bilo je 308 žrtava i 67.500 osoba koje su ostale bez doma. Uništeno je 24.250 stambenih jedinica, a oštećeno 12.296 (slika 9). Procijenjeno je da je nastalo 2.650.000 m<sup>3</sup> građevnog otpada.



Slika 9. Posljedice potresa u provinciji L'Aquila, 2009 [42]

S obzirom na tako ogromnu količinu građevnog otpada koju je trebalo zbrinuti u kratkom vremenu te nužnost osiguranja pristupa zgradama u povijesnim jezgrama, trebalo je organizirati više privremenih odlagališta, mjesta odvajanja i obrade otpada, zajedno s mjestima za skladištenje inertnih materijala koji se mogu ponovno uporabiti ili reciklirati. Uz to je trebalo predvidjeti lokacije za odlaganje neopasnog i nerecikabilnog materijala koji preostaje nakon odvajanja od materijala koji se može reciklirati [43]. Zakonskim okvirom uspostavljene su tri različite lokacije za:

- privremeno skladištenje i odvajanje građevnog otpada te obradu, prikupljanje i skladištenje inertnih materijala za ponovnu upotrebu
- privremeno skladištenje, obradu i odlaganje nastalog građevnog otpada uključujući i otpad nastao uklanjanjem oštećenih građevina
- odlaganje neopasnog otpada preostalog nakon odvajanja i obrade građevnog otpada.

Kako bi se građevni otpad mogao ukloniti iz povijesnih jezgri pogođenih potresom, pojedinačne općine prihvatile su posebne Planove upravljanja otpadom. Tim su planovima identificirane javne površine kojima su vozila mogla jednostavno pristupiti radi odvoze-

nja građevnog otpada. Ujedno je na tim površinama otpad raspoređivan prema ključnim brojevima i stavljan u metalne kante ili velike platnene vreće. Kako bi se olakšale ove aktivnosti i ograničio potreban javni prostor za privremeno skladištenje, privatni subjekti trebali su nastaviti sa selektivnim rušenjem, odvajanjem i skladištenjem građevnog otpada na samom gradilištu. Prijevoz i javnog i privatnog građevnog otpada na odabrane lokacije za obradu provele su vatrogasne postrojbe, vojska, lokalna uslužna tvrtka i nacionalna tvrtka registrirana za upravljanje okolišem. Upravljanje građevnim otpadom obuhvatilo je građevni otpad od srušenih zgrada, od rušenja zgrada koje predstavljaju opasnost za stanovnike i od građevinskih radova koja izvode javna tijela. S građevnim otpadom koji je nastao privatnim popravcima ili rekonstrukcijama građevina upravljalo se u okviru uobičajenog postupanja s građevnim otpadom.

*Regija Emilia-Romagna, 2012.; 5,8 stupnjeva prema Richteru*

Potres je pogodio gusto naseljenu regiju Emilia-Romagna u sjevernoj Italiji prouzročivši 7 smrtnih slučajeva, ozlijedenih je 50 ljudi i oko 5000 ljudi ostalo je bez doma. Nakon toga je uslijedio niz naknadnih potresa te je drugi glavni potres prouzročio još 20 smrtnih slučajeva i oko 350 ozlijedenih ljudi. Nakon ovog drugog događaja, broj ljudi koji su ostali bez doma porastao je na oko 15.000 [1]. Nedugo nakon toga donesena je Uredba o intervencijama nakon katastrofe koja je obuhvaćala upravljanje otpadom od potresa. U ovom slučaju, otpadom se upravljalo kao krutim komunalnim otpadom, klasificirajući ga pod ključnim brojem 20 03 99 (komunalni otpad koji nije specificiran na drugi način) što je omogućilo brži odvoz koji su obavljale postojeće tvrtke za gospodarenje krutim otpadom. Regionalna uredba specificirala je korištenje recikliranog agregata za nasipavanja i druge namjene, npr. za izvedbu podloga cesta, međutim to je ipak ostalo na eksperimentalno-istraživačkoj razini financiranjo od same regije.

### **3.2 Turska**

*Regija Marmara, 1999. 7,4 stupnjeva prema Richteru*

U potresu koji je pogodio regiju Marmara u sjeverozapadnoj Turskoj pогinulo je 15.000 ljudi, a još ih je 44.000 bilo ozlijedeno. Oštećeno je mnogo zgrada tako da je čak 120.000 ljudi ostalo bez domova. Procjenjuje se da je pri tome nastalo približno 13 milijuna tona građevnog otpada koji je odlagan na 17 odlagališta u regiji te mnogim ilegalnim odlagalištima [3]. Sastav građevnog otpada nastalog djelovanjem potresa prikazan je u tablici 7. Nakon potresa, Ministarstvo okoliša uspostavilo je krizni centar koji je poslao stručnjake kako bi pomogli u određivanju lokacija za odlaganje otpada i rješili druga pitanja okoliša. U prvih mjesec dana otpad se hitno uklanjao te se nastavljala potraga za ljudima unutar zgrada, a nakon toga se otpad uklanjao s cesta i velikih površina radi omogućavanja pristupa vozilima. U tom razdoblju nije bilo razvrstavanja građevnog otpada te je odlagan na lokacije koje je odredilo Ministarstvo okoliša ili općine te na ilegalna odlagališta. Građevni otpad prevožen je na odlagališta vozilima iz javnog i privatnog sektora, uobičajenog kapaciteta od 10 tona. Privatne tvrtke provodile su prijevoz temeljem ugovora s nadležnim općinama. Općine su ujedno bile odgovorne za upravljanje građevnim otpadom uključujući rukovanje, recikliranje i odlaganje te su uočene velike razlike u postupanju s nastalim

otpadom prouzročene urbanim, geografskim i finansijskim ograničenjima. Zbog hitnosti pristupa, manje količine otpada ilegalno su odložene duž obale. U nekim pokrajinama, građevni otpad korišten je za nasipavanja pri izgradnji novih sela s montažnim kućama i za zaštitu zemljišta od povremenih riječnih poplava. Ipak, takvim rješenjima treba pristupati s oprezom, budući da otpad od rušenja može sadržavati male udjele opasnog otpada, na primjer teške metale, PCB i azbest. Na dva veća odlagališta postavljene su donirane drobilice koje su isporučene uz ograničenu obuku, nadzor i pomoć u vezi s njihovim radom. Uzimajući u obzir probleme vezano uz sastav miješanog otpada s velikim udjelom organskih tvari, one nisu u punom kapacitetu iskorištene za proizvodnju recikliranog agregata.

**Tablica 7. Sastav građevnog otpada nastao djelovanjem potresa u Marmari, Turska [3]**

| Vrsta otpada  |        | Udio [%] |
|---|--------|----------|
| Reciklabilan  | beton  | 60       |
|   | ziđe   | 25       |
|   | zemlja | 5        |
|   | metali | 5        |
| Nereciklabilan (drvo, plastika, papir, organski materijali) |        | 4        |
| Opasan  |        | 1        |

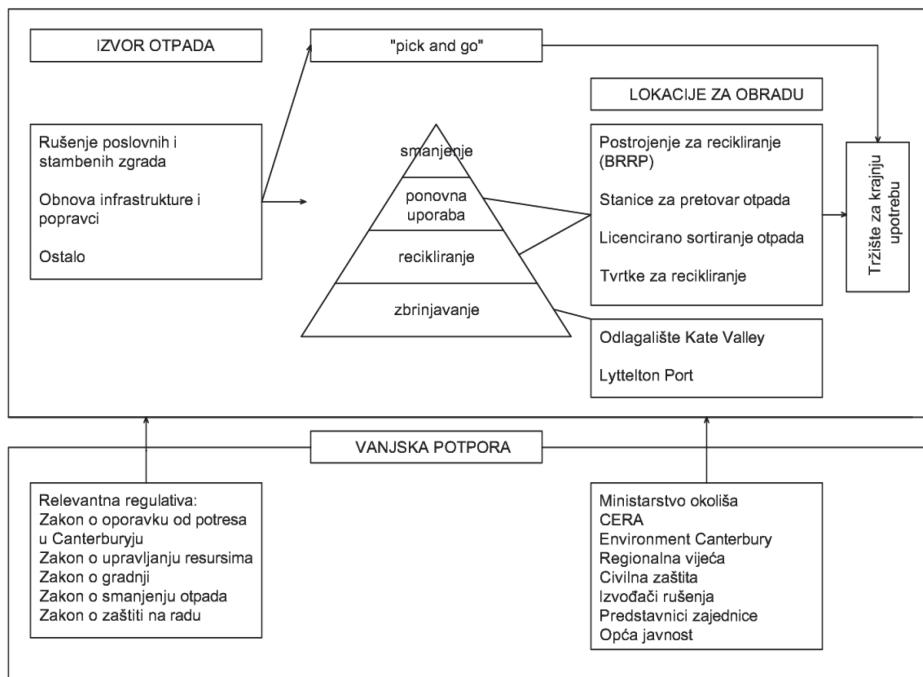
Građevni otpad koji je nastao djelovanjem potresa u Marmari bio je pomiješan sa zemljom, tepisima, odjećom, drvom i drugim materijalima što ga je činilo nereciklabilnim bez dugotrajnog i skupog prethodnog sortiranja. Također, dio otpada bio je odložen na lokacije na kojima ga je bilo gotovo nemoguće naknadno prikupiti. Nedostaci koji su uočeni pri postupanju s građevnim otpadom su sljedeći:

- nekontrolirano odlaganje otpada zahtijevalo je naknadno uklanjanje i odvoz na odlagališta što je dovelo do dvostrukog rukovanja s otpadom te povećanih troškova kao i smanjivanja potencijala njegova recikliranja
- postojao je nedostatak u ovlaštenjima za postupanje s otpadom, tako da u pojedinim slučajevima niti jedan odjel nije bio odgovoran za otpad što je dovelo do velikog broja ilegalnih odlagališta
- prijevoz građevnog otpada provodio se kombinacijom vozila javnog i privatnog sektora; veliki broj ugovora dovodi do neučinkovitog korištenja resursa i nedostatka koordinacije u financiranju i raspodjeli resursa
- u nekim općinama postojala su urbanistička, geografska i finansijska ograničenja pri upravljanju velikim količinama nastalog građevnog otpada što je još pogoršano nedostatkom koordinacije vozila koja su odvozila otpad
- tijekom provođenja hitnih intervencija, na obalu su ilegalno odložene manje količine otpada koje su potencijalno sadržavale i otpad onečišćen opasnim tvarima
- na mnogim odlagalištima otpad se nekontrolirano odlagao i bio je raširen na velikom području što je ometalo naknadno prikupljanje i recikliranje – tako su se više puta trebali koristiti kritični resursi za premještanje otpada
- kapaciteti lokalnih odlagališta nisu bili dovoljni za značajne količine nastalog otpada što upućuje na potrebu planiranja alternativnih lokacija u slučaju katastrofa.

### 3.3 Novi Zeland

*Regija Canterbury, 2010 – 2011.; 7,1 stupnjeva prema Richteru*

U rujnu 2010. i veljači 2011., regiju Canterbury u Novom Zelandu pogodili su jaki potresi. Najviše je bio pogoden grad Christchurch, drugi po veličini u državi. Procijenjeno je da je potrebno srušiti oko 1.000 poslovnih zgrada i 10.000 do 15.000 stambenih jedinica. Pri tome je nastalo približno 8 milijuna tona građevnog otpada. Potres je također znatno oštetio komunalnu infrastrukturu. Budući da nije postojala unaprijed utvrđena procedura za upravljanje građevnim otpadom u slučaju djelovanja potresa, upravljanje nastalim otpadom uglavnom su koordinirale regionalne vlasti, različite vladine organizacije i izvođači koji se bave rušenjem. Zbog hitnosti pojedinih radova rušenja, neki ugovori su odobreni bez uobičajenog postupka nabave. Uspostavljeno je tijelo za oporavak od potresa (CERA) koje je bilo odgovorno za rušenje opasnih zgrada i svih zgrada u tzv. "crvenoj zoni", a osiguravajuća društva upravljala su rušenjem stambenih objekata u drugim područjima. CERA je uspostavila jednostavan pristup uklanjanja otpada ("quick pick and go") kojim je čisti otpad usmjeravan na tržiste, a miješani otpad u postrojenja za obradu ili odlagališta. Za izvođenje rušenja trebalo je dobiti akreditaciju od ureda za upravljanje projektom u nadležnosti CERE. Tako se osiguravalo da će poslove rušenja provesti izvođači s dovoljno stručnosti i iskustva. Na slici 10 prikazan je proces upravljanja građevnim otpadom nakon potresa u regiji Canterbury [39].



Slika 10. Proces upravljanja građevnim otpadom nakon potresa u regiji Canterbury, Novi Zeland [39]

Uspostavljen je postrojenje za recikliranje s linijom za ručno sortiranje i mehaničkim separatorom, uključujući sita i magnete. Na toj je lokaciji obrađeno više od 4 milijuna tona građevnog otpada, osobito miješanog što je omogućilo ponovnu upotrebu i recikliranje otpada koji bi inače završio na odlagalištima. Međutim, to nije bilo dovoljno za upravljanje velikim brojem opasnih materijala, kao što je azbest, koji nisu obrađeni na prikidan način. Također je utvrđeno da nije bilo dovoljno privremenih lokacija za pretovar otpada.

### 3.4 Kina

*Pokrajina Wenchuan, 2008; 7,9 stupnjeva prema Richteru*

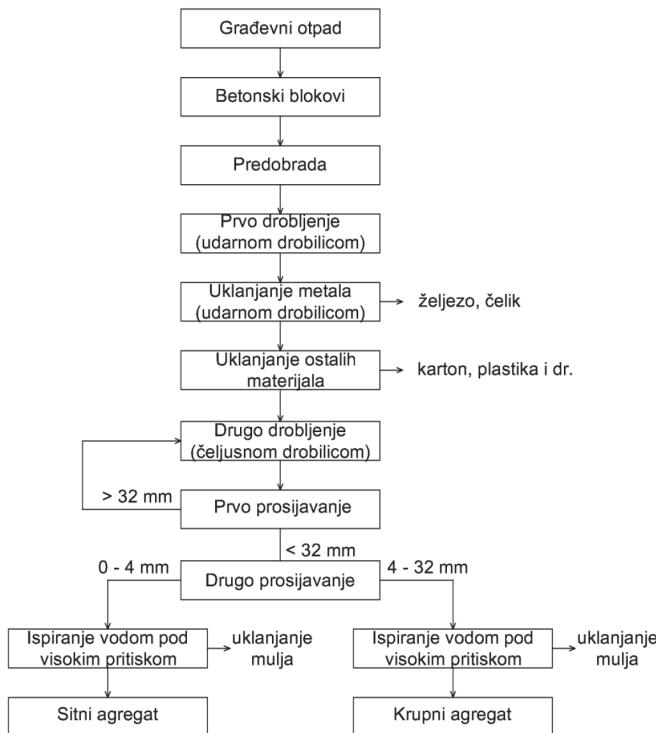
Potres se dogodio u provinciji Sichuan u jugozapadnoj Kini te je ozbiljno pogodio sjeverna područja provincije i neke susjedne regije [44, 45]. Posljedice potresa pretrpjelo je deset provincija, a potresi su se osjetili u Pekingu i Šangaju. Najteže pogodjene zajednice bile su uglavnom smještene u planinskim ruralnim područjima, a spašavanje i pružanje pomoći otežale su i posljedice nekoliko snažnih naknadnih potresa, klizišta, tokovi blata i kamenja te loše vrijeme. Procjenjuje se da je pri tome nastalo oko 380 milijuna tona građevnog otpada čime je znatno premašena ukupna količina ovakve vrste otpada koja u Kini nastane tijekom jedne godine. Količine i udjeli otpada od rušenja u područjima pogodjenim potresom u Wenchuanu prikazani su u tablici 8 [4]. Iz prikazanih podataka može se vidjeti da su u nastalom građevnom otpadu najviše zastupljeni beton i opeka. Poželjno je da se taj materijal u što većoj mjeri lokalno reciklira zbog često ograničenih mogućnosti prijevoza na potresom pogodjenom području, ali i smanjenja ukupnih troškova.

Tablica 8. Količine i udjeli otpada od rušenja u područjima pogodjenim potresom u Wenchuanu [4]

| Materijal     | Količina [mil. tona] | Udio [%] |
|---------------|----------------------|----------|
| Beton         | 208,66               | 54,5     |
| Opeka         | 152,16               | 39,8     |
| Čelične šipke | 8,43                 | 2,2      |
| Drvo          | 12,56                | 3,3      |
| Ostalo        | 0,62                 | 0,2      |
| Ukupno        | 382,43               | 100      |

Ogromna količina krutog otpada dovela je do potrebe za pronalaženjem racionalnih i učinkovitih načina njegove upotrebe, a jedna od mogućnosti je proizvodnja recikliranog agregata i primjena u proizvodnji betona. Postupak recikliranja betona prikazan je na slici 11.

Istraživanja [4] su pokazala da reciklirani agregat dobiven obradom građevnog otpada nastalog djelovanjem potresa u Wenchuanu, ima 10 do 15 % manju gustoću od prirodnog agregata, da mu je nasipna gustoća 1405 do 1726 kg/m<sup>3</sup>, a apsorpcija prilično varijabilna i općenito veća od prirodnog agregata.



Slika 11. Primjer postupka recikliranja betona

### 3.5 Preporuke za poboljšanje sustava upravljanja građevnim otpadom nakon prirodnih katastrofa

Na osnovi iskustva iz Novog Zelanda [39], dane su preporuke za poboljšanje sustava upravljanja građevnim otpadom nakon prirodnih katastrofa:

- unaprijediti postrojenja za preradu otpada (razviti bazu podataka na nacionalnoj razini s detaljima postrojenja za preradu otpada; uspostaviti nova postrojenja za preradu otpada kako bi se zadovoljili zahtjevi za rješavanje hitnih slučajeva u različitim regijama)
- uvesti nove zakone (donijeti planove za upravljanje građevnim otpadom nakon katastrofa; uključiti upravljanje građevnim otpadom nakon katastrofa u postojeće politike upravljanja otpadom)
- poboljšati organizacijski sustav (uspostaviti organizaciju za brzo donošenje odluka u slučaju katastrofe kako bi se ubrzao proces oporavka; jasno dodijeliti odgovornosti i funkcije gospodarenja otpadom svakoj instituciji kako bi se izbjegli sukobi; omogućiti fleksibilnost u procesu donošenja odluka i decentralizirati moć donošenja odluka; uključiti upravljanje otpadom u katastrofama u organizacijske prakse i politike)
- poboljšati komunikaciju i koordinaciju (promicanje suradničkog radnog okruženja – davanje poticaja itd. među uključenim stranama, uglavnom na lokalnoj razini; koristiti ino-

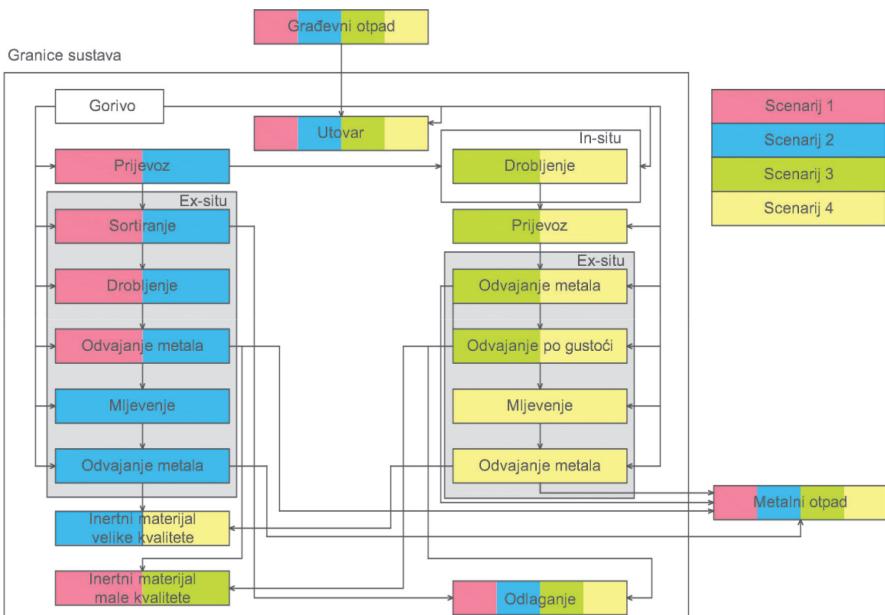
- vativne tehnologije za promicanje učinkovite komunikacije, dodijeliti dovoljno resursa za korištenje inovativnih komunikacijskih mehanizama; odrediti jasne komunikacijske putove i odrediti ljudi na svakoj razini komunikacije)
- uspostaviti radne vještine i programe obuke (vesti programe obvezne obuke i obrazovanja za relevantne dionike (izvođače radova na rušenju, lokalna vijeća itd.; vesti i promovirati kvalifikacije za upravljanje katastrofama)
  - ostalo (promicanje/poticanje tržišta za ponovnu upotrebu i recikliranje proizvoda; uspostava istraživačkih centara i dodjeljivanje sredstva za pronalaženje inovativnih rješenja za gospodarenje otpadom).

Preporuke za organizaciju sustava za upravljanje građevnim otpadom na osnovi iskustva nakon djelovanja potresa u Turskoj prikazane su u tablici 9.

**Tablica 9. Preporuke za organizaciju sustava upravljanja građevnim otpadom nakon potresa [3]**

| Područje  | Organizacija sustava i planiranje prije djelovanja potresa   |
|---|--|
| Organizacija i ovlaštenja<br>(odrediti uloge i osobe) | Odrediti kontakt osobu koja će voditi radove rušenja   |
|   | Uspostaviti ovlaštenje za izvanredne situacije   |
|   | Procijeniti količinu otpada  |
|   | Odrediti broj vozila i izvođača rušenja koji će prevoziti otpad  |
|   | Odrediti pružatelje usluga (izvođači radova rušenja/iskopa, prijevoznici i drugi koji će pomoći u procesu oporavka)                          |
| Zahtjevi za resurse<br>(odrediti postrojenja)         | Odabrati potencijalna privremena skladišna područja za recikliranje otpada   |
|   | Odrediti odlagališta koja se mogu koristiti za skladištenje, mesta prijenosa ili obrade nastalog otpada                                      |
|   | Odrediti stanice za pretovar   |
| Kriteriji za recikliranje/<br>odlaganje               | Identificirati lokacije koje su dostupne područjima osjetljivima na djelovanje potresa (npr. u blizini urbanih središta, čvorišta autocesta) |
|   | Napraviti popis mogućih lokacija: javnih i privatnih   |
|   | Razviti Operativni plan lokacije   |
|   | Izraditi Plan obnove lokacije  |
|   | Odabранe lokacije trebaju biti dovoljne veličine da omoguće skladištenje otpada i sigurno kretanje vozila                                    |
|   | Lokacije trebaju biti prikladne za teški promet, prašinu i buku  |
|   | Zaštita od dodatnih katastrofa – odabранe lokacije trebaju biti udaljene od poznatih aktivnih rasjeda  |
| Tehnički zahtjevi za<br>recikliranje                  | Izbjegavati ekološki osjetljiva područja kao što su močvare i staništa ugroženih vrsta   |
|   | Odabir vrste drobilice i sita s kontaktima dobavljača  |
|   | Obučeno osoblje za rukovanje strojevima  |
|   | Plan kontrole kvalitete kako bi se osigurao reciklirani materijal zadovoljavajuće kvalitete  |
| Zalihe goriva i drugih potrošnih materijala           |  |

U radu [46], analizirani su različiti scenariji upravljanja građevnim otpadom nastalim djelovanjem potresa, uzimajući u obzir ekološke i ekonomske aspekte. Na slici 12 prikazane su granice sustava za analizu životnog ciklusa (LCA) pri čemu je funkcionalna jedinica bila 1.000.000 tona građevnog otpada. Uzimajući u obzir samo ekološke aspekte, zaključeno je da je otpad najbolje obrađivati na samom mjestu nastanka. S druge strane, ekonomska analiza pokazala je da je prijevoz otpada bez prethodnog usitnjavanja/mljevenja više održiva opcija. No, pri tome svakako treba uzeti u obzir realne uvjete i mogućnosti obrade građevnog otpada na lokacijama u blizini njegova nastanka, osobito kada se potres dogodi u gusto naseljenim urbanim sredinama.



Slika 12. Granice sustava uzete u LCA [46]

## 4 Zaključak

Upravljanje građevnim otpadom predstavlja veliki izazov u svim područjima u kojima postoji rizik djelovanja potresa. Još uvijek nema jedinstvenog rješenja kako riješiti problem nastanka ogromnih količina građevnog otpada koje treba zbrinuti u kratkom vremenu. Većina je istraživača suglasna da bi za učinkovito upravljanje građevnim otpadom nastalim djelovanjem potresa trebalo izraditi strategije upravljanja otpadom u slučaju katastrofa koje bi trebale obuhvaćati moguća rješenja za brzi oporavak i funkciranje cijelog sustava. Mjere nakon nastanka potresa trebaju uključivati dodjeljivanje odgovornosti i uspostavu administrativnih procedura. Nakon potresa, u prvoj fazi treba ukloniti otpad s putova za evakuaciju i drugih važnih putova kako bi se osigurao pristup pogodenom području. Druga faza predstavlja duži period koji uključuje organiziranje i

upravljanje skupljanjem građevnog otpada, i aktivnosti vezane uz smanjenje, odvajanje, recikliranje i odlaganje otpada. U strategijama upravljanja otpadom nakon katastrofa potrebno je uzeti u obzir volumen otpada, stupanj miješanja otpada, moguću opasnost za ljudе i okoliš, prioritete lokalne zajednice i mehanizme financiranja. To znači da treba identificirati/odrediti lokacije za privremeno odlaganje građevnog otpada, procijeniti količinu i sastav otpada, identificirati materijale koji se mogu reciklirati te procijeniti opseg radova obnove s mogućnostima za upotrebu recikliranog materijala.

Nakon identificiranja i procjene količine i sastava nastalog građevnog otpada, potrebno je odvojiti otpad koji se nakon čišćenja može ponovno upotrijebiti (npr. opeka i crijeplje). Neopasni mineralni građevni otpad kao što je lom opeke, crijeplje i betona te miješani lom može se reciklirati. Potom treba ispitati relevantna svojstva dobivenog recikliranog agregata te odabratи njegovu namjenu, odnosno odrediti vrstu građevnog proizvoda u kojoj se može upotrijebiti. Europske norme omogućavaju primjenu recikliranog agregata u betonu uz provjeru relevantnih svojstava kao što su sadržaj sitnih čestica, indeks plosnatosti, otpornost na drobljenje, gustoća, apsorpcija, sadržaj sulfata topivih u vodi, sadržaj klorida topivih u kiselini te utjecaj recikliranog agregata na početak vezivanja. Sastav odabranog građevnog proizvoda potrebno je optimizirati u skladu sa zahtjevima norme za konkretni proizvod. Istraživanja su pokazala da se uz optimiziranje sastava betonskih mješavina reciklirani agregati mogu uspješno primijeniti u proizvodnji betonskih opločnika, betonskih zidnih elemenata, fasadnih panela i stropnih okvira. Reciklirani agregat koji ne zadovoljava svojstva za primjenu u određenim građevnim proizvodima može se primijeniti za nasipavanje. Nasipavanje treba biti opcija u slučaju kada ponovna uporaba ili recikliranje za kvalitetnije primjene nisu mogući, a odlaganje treba biti zadnja opcija.

## Literatura

- [1] Faleschini, F., Zanini, M. A., Hofer, L., Zampieri, P., Pellegrino, C.: Sustainable management of demolition waste in post-quake recovery processes: The Italian experience, INTERNATIONAL JOURNAL OF DISASTER RISK REDUCTION, Volume 24, September 2017, pp. 172-182, <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2017.06.015>
- [2] Arslan, H., Coşgun, N., Salgın, B.. Construction and Demolition Waste Management in Turkey (Chapter), Waste Management - An Integrated Vision, (ur. Rebellon, L. F. M.), IntechOpen; London, 2012., <https://doi.org/10.5772/46110>, <https://www.intechopen.com/chapters/40493>
- [3] Baycan, F.: Emergency planning for disaster waste: a proposal based on the experience of the Marmara earthquake in Turkey, International Conference and Student Competition on post-disaster reconstruction "Planning and reconstruction", Coventry, UK, April 22-23, 2004., <http://www.grif.umontreal.ca/pages/papers2004/Paper %20- %20Baycan %20F.pdf>
- [4] Shi, X.-S.; Wang, Q.-Y.; Qiu, C.-C.; Zhao, X.-I.: Recycling Construction and Demolition Waste as Sustainable Environmental Management in Post-Earthquake Reconstruction, 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, pp. 1-5, 2010., <https://doi.org/10.1109/ICBBE.2010.5517915>
- [5] Kufrin, J.: Izvješće o gospodarenju građevnim otpadom u 2020. godini, Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, Zagreb, listopad 2021, [https://www.haop.hr/sites/default/files/uploads/dokumenti/021\\_otpad/Izvjesca/OTP\\_2021\\_Gradjevni\\_izvjesce\\_2020.pdf](https://www.haop.hr/sites/default/files/uploads/dokumenti/021_otpad/Izvjesca/OTP_2021_Gradjevni_izvjesce_2020.pdf)

- [6] Privremeni podaci o gospodarenju građevnim otpadom u 2021. godini, Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, Zagreb, lipanj 2022, [https://www.haop.hr/sites/default/files/uploads/dokumenti/021\\_otpad/Izvjesca/ostalo/Privremeno%202021\\_05%20final\\_0.pdf](https://www.haop.hr/sites/default/files/uploads/dokumenti/021_otpad/Izvjesca/ostalo/Privremeno%202021_05%20final_0.pdf)
- [7] Okvirna direktiva o otpadu (Direktiva 2008/98/EZ), <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/HTML/?uri=CELEX:32008L0098&from=HR>
- [8] Zakon o gospodarenju otpadom (NN 84/21)
- [9] Pravilnik o katalogu otpada (NN 90/15)
- [10] Pravilnik o građevnom otpadu i otpadu koji sadrži azbest (NN 69/16)
- [11] Protokol EU-a za gospodarenje građevinskim otpadom i otpadom od rušenja, rujan 2016, Europska komisija, <http://ec.europa.eu/growth>
- [12] UEPG Annual Review 2020-2021, European Aggregates association, [https://uepg.eu/mediatheque/media/Final\\_-\\_UEPG-AR2020\\_2021-V05\\_spreads72dpiLowQReduced.pdf](https://uepg.eu/mediatheque/media/Final_-_UEPG-AR2020_2021-V05_spreads72dpiLowQReduced.pdf)
- [13] RILEM Report on Recycled Aggregate concrete, Part I - Material Properties, ed. Xiao, J., Zhang, Y., Singh, A., Zhao, Z., Technical Committee for Structural behaviour and innovation of recycled aggregate concrete (RAC), u postupku objavljivanja
- [14] HRN EN 12620:2008 Agregati za beton
- [15] HRN EN 13139:2003 i HRN EN 13139:2003/AC:2006 Agregati za mort
- [16] HRN EN 771-3:2015 Specifikacije za zidne elemente – 3. dio: Betonski zidni elementi (gusti i lagani agregat)
- [17] HRN EN 13043:2003 i HRN EN 13043:2003/AC:2006 Agregati za bitumenske mješavine i površinsku obradu cesta, aerodromskih pista i drugih prometnih površina
- [18] HRN EN 13242:2008 Agregati za nevezane i hidraulički vezane materijale za uporabu u građevinarstvu i cestogradnji
- [19] HRN EN 206:2021 Beton – Specifikacija, svojstva, proizvodnja i sukladnost
- [20] RILEM Report on Recycled Aggregate concrete, Part III Standards and Specifications of RA and/or RAC, ed. Xiao, J.; Zhang, Y.; Singh, A.; Zhao, Z., Technical Committee for Structural behaviour and innovation of recycled aggregate concrete (RAC), u postupku objavljivanja
- [21] Otoko, G.R.: Use of crushed clay bricks as aggregate in concrete, INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY RESEARCH, 2 (2014) 4, pp. 1-9.
- [22] Hansen, T.C.: Recycling of demolished concrete and masonry, London: RILEM Rep. 6, E&FN Spon, 1992.
- [23] Debieb, F., Kenai, S.: The use of coarse and crushed bricks as aggregate in concrete, CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS, 22 (2008) 5, pp. 886-893, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.12.013>
- [24] Liu, X., Lei, T.: Study on early-stage compressive strength of recycled aggregate concrete, Advanced Materials Research, Trans Tech Publications, Ltd., 450-451 (2012), pp. 1261-1264, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.450-451.1261>
- [25] Yang, K.H., Chung, H.S., Ashour, A.F.: Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties, ACI MATERIALS JOURNAL, 105 (2008) 3, <https://doi.org/10.14359/19826>
- [26] Ghazi, O.M.: Properties of hardened concrete using crushed clay brick as aggregates, JOURNAL OF ENGINEERING, 4 (2011) 7, <http://www.iasj.net/iasj?func=fulltext&aid=24511>
- [27] Cheng, G.Y.: Experimental study on the basic performance of recycled aggregate concrete with different displacement ratio, CHINESE CONCRETE JOURNAL, 11 (2005), pp. 67–70.

- [28] Miličević, I., Štirmer, N., Bjegović, D.: Relation between the compressive strength and modulus of elasticity of concrete with crushed brick and roof tile aggregates, *STRUCTURAL CONCRETE*, 18 (2017) 2, pp. 366-375, <https://doi.org/10.1002/suco.201500207>
- [29] Guerra, I., Vivar, I., Llamas, B., Juan, A., Moran, J.: The effects of using recycled ceramic waste from sanitary installations on the mechanical properties of concrete, 2009. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X08001931>
- [30] ECO-SANDWICH® – Energy Efficient, Recycled Concrete Sandwich Facade Panel, [www.eco-sandwich.hr](http://www.eco-sandwich.hr)
- [31] Miličević, I.: Požarna otpornost betona s opekarskim lomom kao agregatom, doktorska disertacija, Građevinski fakultet Osijek, 2014
- [32] Poon, C.S., Chan, D.: Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick, *CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS*, 20 (2006) 8, pp. 569-577, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.044>
- [33] Poon, C.S., Chan, D.: Effects of contaminants on the properties of concrete paving blocks prepared with recycled concrete aggregates, *CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS* 21 (2007) 1, pp. 164-175., <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.06.031>
- [34] Poon, C. S., Lam C. S.: The effect of aggregate to cement ratio and types of aggregates on the properties of pre-cast concrete blocks, *CEMENT AND CONCRETE COMPOSITES*, 30 (2008) 4, pp. 283-289, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.10.005>
- [35] Poon, C.S., Kou, S.C., Wan H.W., Etxeberria, M. Properties of concrete blocks prepared with low-grade recycled aggregates, *WASTE MANAGEMENT*, 29 (2009) 8, pp. 2369-2377, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.02.018>
- [36] Soutsos, M.N., Tang K., Millard, S.G.: Concrete building blocks made with recycled demolition aggregate, *CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS*, 25 (2011) 2, pp. 726-735, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.014>
- [37] Guo, Z., Tu, A., Chen C., Lehman, D.E.: Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of concrete building blocks incorporating recycled concrete aggregates, *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTI-*ON, 199 (2018), pp. 136-149, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.069>
- [38] Xiao, Z., Ling, T.C., Kou, S.C., Wang, Q., Poon, C.S.: Use of wastes derived from earthquakes for the production of concrete masonry partition wall blocks, *WASTE MANAGEMENT*, 31 (2011) 8, pp. 1859-1866, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.04.010>
- [39] Domingo, N., Luo, H.: Canterbury earthquake Construction and demolition waste management Issues and Improvement suggestions, *INTERNATIONAL JOURNAL OF DISASTER RISK REDUCTION*, 22, (2017), pp. 130-138, <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2017.03.003>
- [40] Furcas, C., Balletto, G.: Construction and Demolition Debris Management for Sustainable Reconstruction after Disasters: Italian Case Studies, *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCE AND ENGINEERING*, B1 (2012), pp. 865-873
- [41] The 1976 Friuli Earthquake, <https://www.intrieste.com/2021/05/06/the-1976-friuli-earthquake>
- [42] Recalling The Past: Memories After L'Aquila Earthquake, <https://www.noilaquila.com/memories-after-laquila-earthquake>
- [43] Basti, A.: Sustainable management of debris from the L'Aquila earthquake: environmental strategies and impact assessment, *DETITUS*, Volume 02, June 2018, pg. 112-119, <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2018.13661>
- [44] Mäenpää, M.: Wenchuan earthquake, 2008, <https://disasterhistory.org/wenchuan-earthquake-2008>

- [45] Kafle, B., Mohyeddin-Kermani, A., Wibowo, A.: A report on the visit to the region stricken by the Wenchuan Earthquake, ELECTRONIC JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING, 1 (2008) 1
- [46] Amato, A., Gabrielli, F., Spinozzi, F., Galluzzi, L.M., Balducci, S., Beolchini, F.: Strategies of disaster waste management after an earthquake: A sustainability assessment, RESOURCES, CONSERVATION & RECYCLING, 146 (2019), pp. 590-597, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.033>





## Korištenje pojedinih vrsta otpada kao sirovine u građevinskoj industriji

Autori:

Izv.prof.dr.sc. Dražen Vouk<sup>1</sup>, Anđelina Bubalo<sup>1</sup>,  
doc.dr.sc. Domagoj Nakić<sup>1</sup>, prof.dr.sc. Nina Štirmser<sup>1</sup>,  
izv.prof.dr.sc. Mario Šiljeg<sup>2</sup>, dr.sc. Karlo Nađ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb

<sup>2</sup> Sveučilište Sjever, Varaždin

<sup>3</sup> Institut Ruđer Bošković, Zagreb

# Korištenje pojedinih vrsta otpada kao sirovine u građevinskoj industriji

Dražen Vouk, Anđelina Bubalo, Domagoj Nakić, Nina Štirmer, Mario Šiljeg, Karlo Nađ

## Sažetak

Zbrinjavanja otpada u okvirima kružnog gospodarstva između ostalog podrazumijeva i korištenje otpada ili nusprodukata dobivenih obradom otpada u građevinskoj industriji, kao sirovine za proizvodnju novih građevinskih materijala i proizvoda, poboljšanja tla, ispuna i dr. U radu su navedeni brojni primjeri pozitivne svjetske prakse, koja se temelji na znanstveno-istraživačkom radu. Detaljnije su opisani i primjeri pozitivne prakse u Republici Hrvatskoj, a na osnovi rezultata istraživačkih projekata RESCUE i BRAVOBRICK koji se provode na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, u suradnji s ostalim znanstvenim institucijama.

***Ključne riječi:*** otpad, građevinska industrija, mulj, beton, opeka, RESCUE, BRAVOBRICK

## The use of certain types of waste as raw material in the construction

### Abstract

Waste disposal within the framework of the circular economy, among other things, includes the use of waste or by-products obtained from waste treatment in the construction industry, as raw materials for the production of new construction materials and products, soil improvement, filling, etc. The paper contains numerous examples of positive world practice, which is based on research work. Examples of positive practice in the Republic of Croatia, based on the results of research projects RESCUE and BRAVOBRICK, which have been carried out at the Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, in cooperation with other scientific institutions, are described in more detail.

***Key words:*** waste, construction industry, sewage sludge, concrete, brick, RESCUE, BRAVOBRICK

## 1 Uvod

Suvremeni način života, konstantan rast populacije, industrijalizacija i sve veći tehnološki razvoj značajno utječe na sve veću proizvodnju otpada. Otpad je zasigurno jedan od gorućih problema današnjice. Odlaganje otpada na odlagališta otpada onečišćuje zrak u vidu prašine, lebdećih čestica, te stakleničkih plinova ako se radi o biorazgradivom otpadu, koji je između ostalog zabranjeno odlagati na odlagalištima prema zakonima Europske unije. Osim negativnog utjecaja na zrak, odlaganje otpada posebice ima negativan utjecaj na tlo i samim tim i na podzemne vode, što je uglavnom povezano s organskom onečišćujućom tvari i teškim metalima te njihovim svojstvom bioakumulacije.

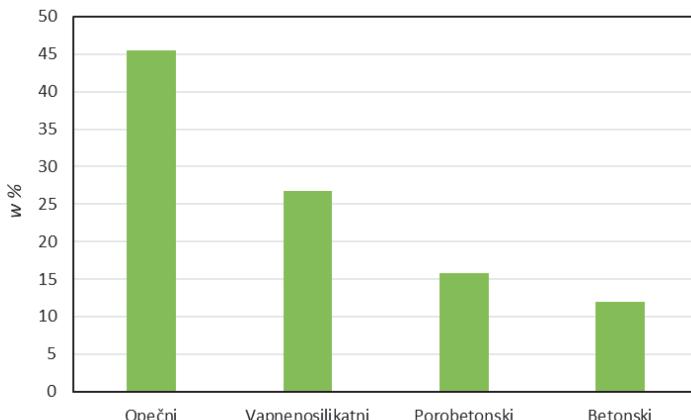
Industrijski otpad uglavnom čine nusproizvodi različitih procesa proizvodnje, u ovoj kategoriji otpada zasigurno su najznačajniji mulj s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV), pepeo iz procesa spaljivanja/uplinjavanja mulja, troska, pepeo s dna peći i lebdeći pepeo iz termoelektrana, cementna prašina, prašina od opeke, ostali građevinski otpad od rušenja, otpadno staklo, silicijeva prašina, celulozni otpad i dr.

Posljednjih godina sve više se istražuju mogućnosti zbrinjavanja otpada, posebice anorganskog otpada u građevinskoj industriji. Građevinska industrija zasigurno je jedan od najvećih potrošača prirodnih resursa, pri čemu su neki od najznačajnijih glina, pijesak, voda, kamen. Osim uporabe prirodnih resursa, građevinska industrija veliki je potrošač energije, te se u procesima oslobađaju značajne emisije  $\text{CO}_2$ , a posebice u postupcima proizvodnje cementa

Uporaba otpadnih materijala kao alternativnih sirovina u građevinskoj industriji značajno bi umanjila negativan utjecaj na iscrpljivanje prirodnih resursa, minimizirala odlaganje otpada na odlagališta te negativne utjecaje na okoliš u skladu s načelima kružnog gospodarstva koje nalaže i regulativa Europske unije. Veliki broj istraživanja usmjeren je proizvodnju građevinskih materijala uvođenjem otpadnih alternativnih sirovina u cilju zatvaranja kruga i napuštanja "end of pipe" tehnologija. Prakse čistije proizvodnje predstavljaju integrirani pristup gospodarenja otpadom u industriji, kojima se ostvarivanjem veze između novih tehnologija, procesa i proizvoda postižu ciljevi poput ponovnog korištenja, recikliranja i održivog razvoja te dobivanje "zelenih" materijala. Ovakav pristup podrazumijeva ekonomičan i okolišno prihvatljiv sustav koji obuhvaća poboljšanja u iskoriščavanju energije, korištenju sirovih materijala (kroz recikliranje otpada) te smanjenje emisija štetnih tvari i količine otpada. Odlagališta otpada sadrže tone otpada koji bi se potencijalno mogao iskoristiti kao zamjenska ili alternativna sirovina u proizvodnji "zelenih" građevinskog materijala.

Jedan od najznačajniji materijala u građevinskoj industriji je beton koji se proizvodi od cementa, agregata i vode. Iako relativno jeftin materijal, njegovu proizvodnju karakterizira velika potrošnja energije te se emitiraju značajne emisije  $\text{CO}_2$  u atmosferu. Stoga je značajan broj istraživanja usmjeren upravo u betonsku industriju i zamjenu udjela cementa s mineralnim aditivima (anorganskim otpadom) s ciljem zaštite okoliša i doprinosa očuvanju energije te zbrinjavanja značajnih količina različitih tipova pepela. Osim betona kao građevinskog materijala s najširom uporabom, sve više se istražuje i uporaba otpadnih materijala za proizvodnju betona visoke čvrstoće, koji u mješavini ima različite dodatke (silicijev dioksid, lebdeći pepeo i sl.), asfaltni beton, opeka, crijevovi, keramičke pločice, pločnici, montažne jedinice, za oblaganje, stabilizaciju tla, popunjavanje kanala i sl. [1].

Opekarski proizvodi imaju široku primjenu, pa je i njihova proizvodnja značajna (slika 1.). Gлина je osnovna sirovina koja se koristi za proizvodnju keramike. U proizvodnji građevinske opeke to je opekarska gлина, tj. ilovača ili druge slabije vrste gline, koja se može koristiti samostalno ili s uporabom aditiva kao što su npr. pijesak, piljevina i sl.



Slika 1. Zastupljenost zidnih elemenata u industriji [1]

Tradicionalni zidni elementi nisu ekološki prihvativi, ponajviše zbog proizvodnje koja zahtijeva veliki utrošak energije. To se posebice odnosi za glinenu pečenu opeku i ostale proizvode od keramike. Posljednjih desetljeća povećala se potražnja za proizvodnjom opeke zbog sve intenzivnije gradnje, a s druge strane sve više se promiče proizvodnja i uporaba "zelenih" materijala [2]. Pri tome je vrlo bitno uz okolišne, zadovoljiti i ekonomski aspekti. Stoga se pred građevinsku industriju stavlja izazov iznaći rješenje koje će zadovoljavati sve relevantne aspekte. Alternativni materijali predstavljaju ekološki prihvativije materijale od onih koji se standardno koriste u proizvodnji građevinskih materijala i proizvoda.

Zbog svega navedenog posebna pažnja se pridaje i uvođenju alternativnih sirovina u proizvodnju i analizu kvalitete opeke koja će se proizvesti od takvih sirovina [3].

Zbog povoljnijih svojstava opeke koja se odlikuju u čvrstoći, dobroj toplinskoj izolaciji, jednostavnosti rukovanja i zidanja i danas se preferira njena primjena pri izradi manjih stambenih, javnih i gospodarskih zgrada [4].

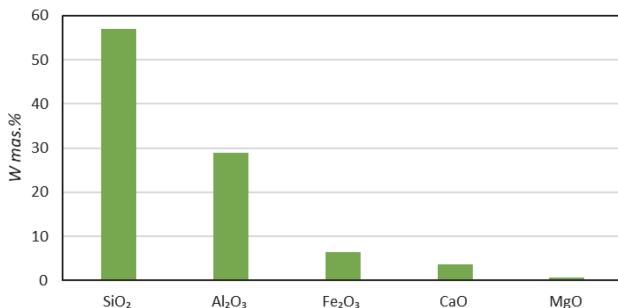
Jedan od ključnih faktora je minimizirati štetne utjecaje na okoliš prilikom proizvodnje građevinskih materijala, u konkretnim slučajevima betona i glinene opeke. Velika potrošnja prirodnih resursa i energije ima značajan utjecaj na okoliš te je zbog toga vrlo bitno razmotriti primjenu alternativnih materijala u proizvodnji ovih građevinskih materijala [5].

## 2 Alternativni materijali u proizvodnji građevinskih elemenata

### 2.1 Pepeo

#### 2.1.1 Lebdeći pepeo

Lebdeći pepeo nusproizvod je izgaranja ugljena ili biomase u elektroenergetskim postrojenjima. Lebdeći pepeo svrstava se u grupu umjetnih pucolana zbog sastava bogatog aluminijevim i silicijevim oksidima. Zbog toga je prikladan kao osnovni materijal u proizvodnji šupljih blokova od gline, a koristi se još i u proizvodnji betona [6]. Pomiješan s vodom i vapnom čini smjesu sličnu portlandskom cementu. Optimalan udio lebdećeg pepela u proizvodnji građevinskih materijala je 5 -10 mas. %. Kemijski sastav i kvaliteta lebdećeg pepela koji potječe iz različitih elektrana je promjenjiv [7]. Razlikuju se dvije uobičajene vrste lebdećeg pepela, razreda F i razreda C. Glavna razlika između ova dva razreda je u udjelima kalcija, silicija i aluminija [8]. Sagorijevanje tvrđeg i starijeg antracita te bitumeniziranog ugljena obično rezultira generiranjem lebdećeg pepela razreda F. Za ovaj tip pepela karakterističan je sastav s masenim udjelom manjim od 7 % CaO te SiO<sub>2</sub> što doprinosi smanjenju rizika od prodiranja soli u materijal, odnosno pojave "iscvjetavanja". Kemijski sastav lebdećeg pepela razreda F prikazan je grafički na Slici 2. [8]. Pepeo razreda C generira se sagorijevanjem mlađeg antracita te subitumeniziranog ugljena, sastav ovog tipa pepela karakterističan je po većim udjelima CaO ( $\geq 20\%$ ), a udio ugljika manji je od 2 %, zbog čega kod ovog tipa pepela nema potrebe za dodatkom aktivatora za stvarnjavanje [9].

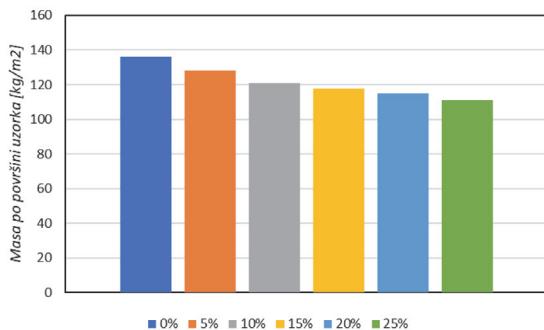


Slika 2. Kemijski sastav lebdećeg pepela razreda F [8]

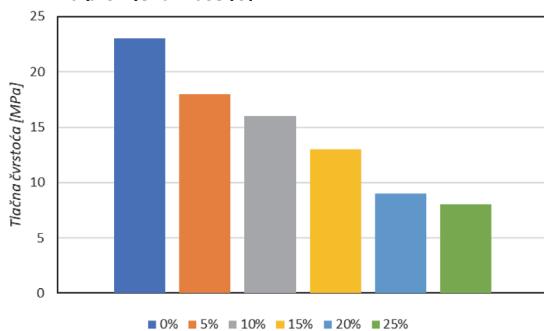
U nastavku su prikazani rezultati ispitivanja opeke s lebdećim pepelom. Pregledom literature za izradu opeke u laboratorijskom mjerilu, lebdeći pepeo zamijenio je osnovnu sirovину glinu u masenim udjelima od 5, 10, 15, 20 i 25 %. Sirovine prethodno nisu prošle nikakvu obradu. Provedene su kemijska i granulometrijska analiza gline i letećeg pepela kako bi se dobole točne karakteristike materijala. Izrađeni su uzorci opeke dimenzija 225 x 112 x 75 mm. Sirovine u krutom stanju miješane su u željenim omjerima sve dok se dodatkom vodom ne postigne homogena plastična smjesa iz koje se daju oblikovati opeke. Svježe pripremljeni uzorci opeke sušili su se 5 dana na zraku ili pomoću laboratorijskog sušionika, nakon čega su se pekli u peći na 800 °C tijekom tri dana [6].

Rezultati su dani grafički, (slike 3. do 5.) i određeni su prema ASTM normi, a za svaki sastav opeke s različitim udjelima lebdećeg pepela ispitano je 5 uzoraka.

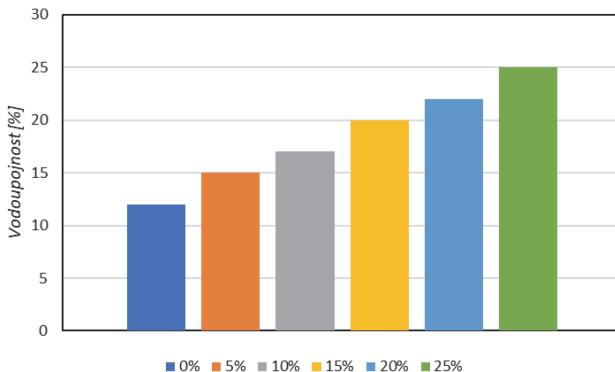
Prikazani rezultati (slike 3. do 5.) vrijednosti mase po površini uzorka i tlačne čvrstoće smanjuju se s povećanjem udjela lebdećeg pepela, dok vodoupojnost linearno raste s povećanjem udjela lebdećeg pepela. Pretpostavlja se da je razlog pada tlačne čvrstoće potreba za višom temperaturom koja je potrebna lebdećem pepelu kako bi došlo do kalcinacije i kako bi se postigla veća čvrstoća. Odstupanja između uzoraka s istim udjelom lebdećeg pepela mogu biti zbog načina proizvodnje i sastava lebdećeg pepela. Opeke s višim udjelima lebdećeg pepela su poroznije te se zbog toga i svojstvo vodoupojnosti povećava. Optimalna vrijednost vodoupojnosti trebala bi biti  $\leq 17\%$ . Drugim riječima, povećanje udjela lebdećeg pepela u sastavu opeke rezultiralo je opekom lošije kvalitete u odnosu na opeke koje su izrađene tradicionalno u potpunosti od gline. Povećanje udjela lebdećeg pepela utjecalo je na smanjenje mase samog uzorka opeke. Lebdeći pepeo ima manju specifičnu težinu u odnosu na glinu, zbog neplastičnosti i visokoporoznosti. No danas se sve više favoriziraju lagane opeke za određene namjene (npr. na seizmičkim područjima jer opeka manje mase smanjuje i ukupnu vlastitu težinu građevine) zbog postizanja nižih cijena transporta i uštede energije, a samim tim i smanjenjem emisija CO<sub>2</sub>. Iako su mehanička svojstva opeke s dodatkom lebdećeg pepela neznatno lošija, ostale prednosti se očituju u smanjuju energije pri proizvodnji, te cijena ovakvog tipa opeke postiže 20 % manju cijenu u odnosu na obične glinene opeke, a uz to ima i zadovoljavajuću otpornost na požar [6].



Slika 3. Eksperimentalni rezultati ispitivanja uzorka opeke s različitim udjelima lebdećeg pepela, utjecaj na promjenu mase [6]



Slika 4. Eksperimentalni rezultati ispitivanja uzorka opeke s različitim udjelima lebdećeg pepela, utjecaj na tlačnu čvrstoću [6]



Slika 5. Eksperimentalni rezultati ispitivanja uzoraka opeke s različitim udjelima lebdećeg pepela, utjecaj na vodoupojnost [6]

### 2.1.2 Pepeo nastao termičkom obradom mulja s UPOV-a

Geoinženjerska ispitivanja su pokazala da je optimalan omjer pepela dobivenog kao nusprodot spaljivanja mulja s UPOV-a s cementom ili hidratiziranim vapnom 4:1 za primjenu stabiliziranja mekog podzemlja kohezivnih tala [10, 11]. Sinterirani ili vitrificirani pepeo ovog tipa također se može koristiti kao agregat [12, 13]. Prema istraživanjima pepeo kao nusprodukt termičke obrade mulja s UPOV-a (monospaljivanja) u reaktoru s fluidiziranim slojem klasificiran je kao neadekvatan za nasipe i cestovne zrnate podloge zbog visoke vrijednosti indeksa apsorpcije vode i raspodjele čestica male veličine. Svojstvo neplastičnosti i nizak udio pijeska koji je karakterističan za ovaj tip pepela ukazuje na potencijalne nedostatke za uporabu punila u cestovnim radovima [14]. Ipak, ova vrsta pepela se može koristiti kao punilo u bitumenskim smjesama s boljim rezultatima nego što je navedeno za punilo za mješavine s vagnencima i, slično tome, za ostala aktivna punila [15]. Dhir i sur. navode u SAD-u geotehničku primjenu pepela iz mulja kao pokrovnog materijal odlagališta, no u studiji nema dovoljno podataka o samoj izvedbi [16]. U Japanu je oko 22.000 tona pepela iz mulja upotrijebljeno kao sekundarna sirovina za poravnavanje zemljista i puteva te u melioraciji tla.

Karakteristike pepela iz mulja i njegovo korištenje procijenjeni su korištenjem objavljene literature u proizvodnji keramike, primjerice opeke, pločica i staklokeramike. Pokazano je da pepeo iz mulja ima slična kemijska svojstva kao poznati keramički materijali i pri toplinskoj obradi postiže željeno zgušnjavanje, povećanje čvrstoće i smanjenje apsorpcije. Kod opeke i pločica, tehnički zahtjevi koji se odnose na čvrstoću, apsorpciju i trajnost su ostvareni. Svojstvo fluksa pepela iz mulja dopušta niže temperature pečenja tijekom proizvodnje keramike, no smanjenje plastičnosti smjese dovodi do većih potreba za vodom u procesu oblikovanja. Termička obrada i priroda keramičkih proizvoda također su učinkovito ograničili izluživanje teških metala prisutnih u pepelu na vrlo niske razine. Različiti uzorci pepela iz mulja opisani su kao prilično kohezivan materijal prosječne veličine čestica oko 80 -1500 µm [17]. Čestice pepela nepravilnog su oblika i teksture hraptave površine. Pepeo iz mulja također se opisuje kao sitnozrnati materijal, a analiza

finoće pepela iz mulja, zajedno s raspodjelom veličine čestica ukazuje na to da se pepeo iz mulja sastoji pretežno od finih čestica veličine pjeska i praha, što ukazuje na prirodnu prikladnost materijala kao punila kod keramike, kao zamjena za glinu nakon postupka mljevenja i kao zamjena za cement u proizvodnji cementnog morta, betona i betonskih elemenata. Prosječna gustoća pepela iz mulja usporediva je s gustoćom svijetlog pjeska. Proces mljevenja također pomaže u poboljšanju povećanja homogenosti veličine čestica.

Zbog povoljnog kemijskog i mineralnog sastava mulja, pepeo iz mulja s UPOV-a može biti sastavni dio opeke ili betona.

U proizvodnji opekarskih proizvoda (keramike) moguće je koristiti pepeo iz mulja za proizvodnju punih opeka, opečnih opeka, perforiranih opeka i opeka sa šupljinama za zrak. Ove vrste opeke mogu se proizvesti od materijala koji u svom sastavu sadrže (osim gline) velike količine pepela (do 90 %) pri čemu su proučavana fizikalno-kemijska svojstva opeke proizvedene od sirovina za proizvodnju građevinske keramike koja sadrži 10-20 % mulja s UPOV-a u mokrom i suhom stanju [18]. Utvrđeno je da se ovakav materijal može koristiti za proizvodnju građevinskih materijala i proizvoda zbog visokog udjela silicija Si (60 % suhe tvari) i aluminijevog oksida  $Al_2O_3$  (10 % ST) u pepelu. Dokazano je da pepeo iz mulja sadrži slične kemijske karakteristike kao afirmirani keramički materijali i da se pri toplinskoj obradi postiže željena gustoća, povećanje čvrstoće i smanjenje apsorpcije te da se u proizvodnji opeke i crijepe mogu postići tehnički zahtjevi koji se odnose na čvrstoću, apsorpciju i trajnost uz jednostavnu izvodljivost uz ugradnju pepela iz mulja kao djelomične zamjene za glinu [19].

Potencijalne koristi od upotrebe pepela iz mulja u proizvodnji opekarskih materijala uključuju imobilizaciju teških metala u pečenom kalupu, oksidaciju organskih tvari i uništavanje svih patogena tijekom procesa pečenja te dobru otpornost na mraz. Potrebno je naglasiti da materijal koji u sebi sadrži pepeo dobiven termičkom obradom mulja i koji se koristi u građevinske svrhe treba zadovoljiti sve tražene standarde i kriterije, kako tehničke, tako i ekološke [20].

U današnje vrijeme svjetski trend predstavlja istraživanje i primjena tehnoloških postupaka izdvajanja fosfora iz mulja s UPOV-a, s obzirom da su količine rude iz koje se danas fosfor primarno dobiva ograničene i da im jedinična cijena s vremenom raste. Do danas je razvijeno nekoliko desetaka različitih tehnologija izdvajanja fosfora iz mulja, a rijetke su primijenjene i u praksi (npr. UPOV Hamburg, Njemačka). Nakon ekstrakcije fosfora iz pepela iz mulja, pepeo sadrži frakciju koja je netopiva u kiselinama, što znači da oko 50-60 % pepela završi kao ostatak silikatnog pjeska, a taj ostatak silikatnog pjeska, kako bi se izbjeglo odlaganje na odlagalištima, može doprinijeti kružnoj ekonomiji i održivoj budućnosti. Ostaci silikatnog pjeska mogu biti adekvatna zamjena cementu, a isto tako i sirovina u izradi opeke [21].

### 3 Rezultati znanstvenih istraživanja u RH

#### 3.1 Ugradnja pepela dobivenog termičkom obradom mulja s UPOV-a u beton

Istraživanje je provedeno u sklopu uspostavnog istraživačkog projekta RESCUE, koji je provodio Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, a finansirala ga je Hrvatska zaklada za znanost. Osnova istraživanja je prikupljanje stabiliziranog i dehidriranog mulja s više UPOV-a u RH, a u sklopu ovog rada posebno će se istaknuti rezultati dobiveni korištenjem mulja s UPOV-a Zagreb koji sadrži oko 31-32 %ST. Prikupljeni mulj je sušen u laboratorijskom sušioniku (slika 6.) do razine iznad 90 % ST na temperaturi oko 105°C. Osušeni mulj je zatim podvrgnut termičkoj obradi (procesu spaljivanja) u električnoj laboratorijskoj peći u trajanju 2.5 h pri temperaturi 850°C (slike 6. i 7.). U primijenjenom postupku termičke obrade dobiven je pepeo u kombinaciji praha te sitnijih i krupnijih granula (slika 7.). Dobivene granule pepela su samljevene korištenjem laboratorijskog mlina te su naknadno prosijane (slika 8.) kako bi se dobio fini praškasti materijal usporediv s pepelom iz realnih spalionica mulja koje koriste tehnologiju s izgaranjem u vrtložnom sloju i koji je povoljniji za ugradnju u građevinske proizvode.



Slika 6. Korištena laboratorijska oprema u procesu sušenja i spaljivanja mulja (sušionik i električna peć)



Slika 7. Užareni mulj tijekom spaljivanja i granule stvrđnutog pepela nakon spaljivanja na 850°C



Slika 8. Proces mljevenja granula pepela i prosijavanja finih čestica pepela (ostatak na situ označen crveno se ponovno melje)

Dobivenom pepelu određena je gustoća prema postupku određivanja gustoće cementa (ASTM C-188) kako bi se osigurali svi potrebni podatci za proračun sastava betona koji je korišten u istraživanju. U tablici 1. prikazana je gustoća pepela dobivenih spaljivanjem (na različitim temperaturama) mulja s različitim UPOV-a u RH. Dodatno je provedena analiza granulometrijskog sastava pepela dobivenog termičkom obradom mulja sa zagrebačkog UPOV-a. (slika 9.). Određivanje kemijskog sastava pepela temeljilo se na analiziranju udjela pojedinih oksida iz praškastog materijala, a rezultati za kemijski sastav pepela dobiven spaljivanjem mulja (pri temperaturi 850°C) s UPOV Zagreb su prikazani u tablici 2. U tablici 3. je za isti pepeo prikazan sadržaj teških metala analiziran u kiselom eluatu – zlatotopci.

Tablica 1. Gustoća pepela dobivenih spaljivanjem (na različitim temperaturama) mulja s različitim UPOV-a u RH ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

| Izvor (porijeklo) mulja (pepela) | Temperatura spaljivanja |       |        |
|----------------------------------|-------------------------|-------|--------|
|                                  | 800°C                   | 900°C | 1000°C |
| UPOV Karlovac                    | 2,67                    | 2,73  | 2,83   |
| UPOV Koprivnica                  | 2,78                    | 2,95  | 2,93   |
| UPOV Zagreb                      | 2,69                    | 2,75  | 2,77   |



Slika 9. Granulometrijski sastavi pepela dobivenih iz mulja sa zagrebačkog UPOV-a [22]

**Tablica 2. Kemijski sastav ([ % mas.]) proizvedenog pepela s UPOV Zagreb i usporedni prikaz s prosječnim vrijednostima iz svjetske literature [23, 24]**

| Oksid                          | UPOV Zagreb | Prosjeek iz svjetske literature |
|--------------------------------|-------------|---------------------------------|
|                                | 850°C       |                                 |
| CaO                            | 26,3        | 16,74                           |
| SiO <sub>2</sub>               | 45,0        | 33,13                           |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 8,62        | 12,43                           |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5,09        | 11,47                           |
| MgO                            | 2,21        | 2,17                            |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 5,31        | 10,7                            |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,32        | 0,65                            |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,38        | 0,73                            |
| K <sub>2</sub> O               | 0,53        | 1,29                            |
| SO <sub>3</sub>                | 4,06        | 5,74                            |
| ostatak                        | 2,18        |                                 |

**Tablica 3. Analize sadržaja teških metala u pepelu [23]**

| Parametar | Jed, mjere | ZG 900°C |
|-----------|------------|----------|
| Cu        | mg/L       | 2,2      |
| Zn        | mg/L       | 5,11     |
| Ni        | µg/L       | 94,67    |
| Cd        | µg/L       | 12,51    |
| Pb        | µg/L       | 92,2     |
| Cr        | mg/L       | 0,080    |
| Co        | mg/L       | 0,82     |

Testovi izluživanja korišteni su kao metoda za utvrđivanje mogućnosti iznošenja pojedinih potencijalno opasnih elemenata i spojeva pri dugogodišnjoj izloženosti materijala (otpada) djelovanju vode, što je posebice važno ukoliko se otpad zbrinjava na odlagalištima ili koristi za proizvodnju novog proizvoda. Testovi izluživanja pepela provedeni su prema normi HRN EN 12457-2 koristeći tzv. šaržni test izluživanja (engl. *batch leaching test*). Na isti način naknadno je ispitano i izluživanje krhotina betona (betonske šestero-kutne prizme) s ugrađenim 10 %-tним udjelima pepela.

Tablica 4. Rezultati ispitivanja izluživanja iz uzoraka pepela i krhotina betona s 10 %-tnim udjelima istog pepela (L/S=10 l/kg) [22]

| Parametar                     | Jed, mjere | UPOV                                     |                       |
|-------------------------------|------------|--|-----------------------|
|                               |            | Zagreb – termička obrada mulja pri 850°C | Beton (s 10 % pepela) |
| Cl <sup>-</sup>               | mg/l       | 59,0                                     | 4,0                   |
| F <sup>-</sup>                | mg/l       | 0,86                                     | 0,55                  |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | mg/l       | 440                                      | 122                   |
| DOC                           | mg/l       | 6,89                                     | 2,64                  |
| Cu                            | mg/l       | 0,01                                     | < DL                  |
| Zn                            | mg/l       | 0,011                                    | 0,007                 |
| Ba                            | µg/l       | 216,3                                    | 2,28                  |
| Pb                            | µg/l       | 71,32                                    | < DL                  |
| Cd                            | µg/l       | 0,060                                    | < DL                  |
| Ni                            | µg/l       | < DL                                     | < DL                  |
| As                            | µg/l       | 8,52                                     | 10,8                  |
| Cr                            | mg/l       | 1,097                                    | 0,047                 |
| Se                            | µg/l       | 27,0                                     | 1,42                  |
| Mo                            | µg/l       | 197,1                                    | 1,82                  |

\*< DL – ispod granice detekcije

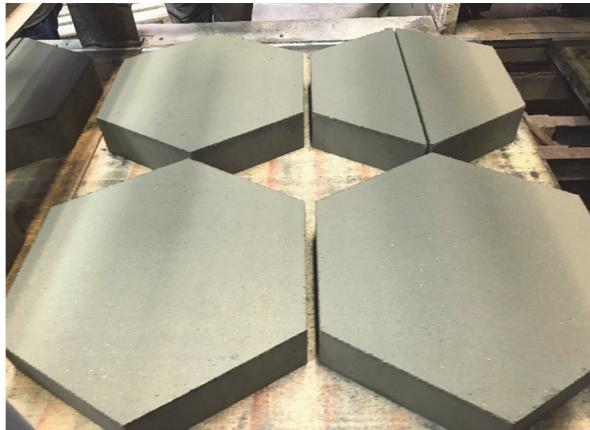
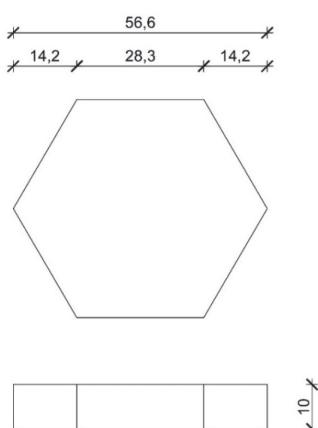
Za potrebe istraživanja proizведен je beton uz korištenje miješanog portlandskog cementa CEM II/B-M (S-V) 42.5N, prirodnog i drobljenog agregata, superplastifikatora (wetophobe) te vode iz sustava javne vodoopskrbe. Istraživanje je provedeno u suradnji s tvrtkom Beton-Lučko d.o.o. Mješavine su pripremljene u automatiziranoj miješalici uobičajenim postupkom koji se koristi u pogonu tvrtke Beton-Lučko d.o.o. u količini od 0.5 m<sup>3</sup>. Pepeo dobiven spaljivanjem mulja s UPOV-a Zagreb korišten je kao zamjena za 10 % cementa u proizvodnji odabranog betonskog elementa - šesterokutne prizme. Beton je ugrađen u standardne kalupe uz vibriranje i uz korištenje hidrauličke preše. Oblikovani betonski elementi ostavljeni su da dozrijevaju u okolnim uvjetima tijekom 28 dana. Odabrani betonski element (šesterokutna prizma) služi za oblaganje pokosa vodotoka i kanala (slika 10.), ali može se koristiti i kao element za popločavanje teško opterećenih prometnica, brodskih pristaništa i javnih parkirališta s obzirom na svoju geometriju i mehaničke karakteristike (čvrstoća i dr.). Uobičajeno se izrađuje u dvije visine (10 i 20 cm), a s obzirom na ograničene količine dostupnog pepela, za provođenje ovog istraživanja odabrana je prizma s visinom 10 cm isključivo zbog manjih potrebnih količina pepela. Potrebno je naglasiti da se šesterokutna prizma izrađuje iz dva sloja betona: osnovni ili nosivi sloj u debljini 9 cm i završni sloj u debljini oko 1 cm. Pepeo je korišten kao zamjena za dio cementa isključivo u osnovnom (nosivom) sloju koji predstavlja volumenski veći dio samog elementa. Detaljni prikazi odabranog elementa u obliku građevinskog nacrta dan je na slici 11.

Uzorci za provedbu potrebnih ispitivanja uzeti su iz gotovih proizvedenih šesterokutnih prizmi pri starosti 28 dana. Za potrebe ispitivanja korištene su norme HRN EN 1339:2004 i HRN EN 1339:2004/AC:2007.



Slika 10. Primjena šesterokutne prizme u praksi - za oblaganje otvorenih vodotoka/kanala

Osnovna fizikalna i mehanička svojstva gotovih betonskih šesterokutnih prizmi i rezultati provedenih ispitivanja dati su u tablici 5. Mehanička svojstva ispitivana kao čvrstoća na savijanje daju zadovoljavajuće rezultate za korišteni pepeo (4.7 MPa, dok je minimalni uvjet zadovoljenja traženog razreda čvrstoće 4.0 MPa). Za silu loma također su postignuti povoljni uvjeti kod betonskog elementa s ugrađenim pepelom (20.3 kN, dok je minimalni uvjet zadovoljenja tražene sile loma 14.0 kN). Prizme s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV-a Zagreb zadovoljavaju i u pogledu vrijednosti upijanja vode (4.6 % naspram maksimalno dozvoljene vrijednosti od 6.0 %). Preostali zahtjevi koji se odnose na otpornost na smrzavanje/odmrzavanje sa soli te otpornost na habanje vežu se na završni sloj (debljine oko 1 cm) u koji pepeo nije niti ugrađivan te su stoga i rezultati ovih ispitivanja istovjetni rezultatima na uobičajenim šesterokutnim prizmama iz redovnog proizvodnog programa bez ugradnje pepela.



Slika 11. Detaljni nacrt betonske šesterokutne prizme i slika gotovog proizvoda

Tablica 5. Fizikalna i mehanička svojstva gotovih betonskih šesterokutnih prizmi s ugrađenim 10 %-tним udjelima pepela [22]

| Svojstvo  | Šesterokutna prizma s pepelom iz mulja s UPOV-a Zagreb                                      | Uvjet odgovarajućeg razreda   |
|---|---|---|
| Čvrstoća na savijanje   | 4,7 MPa   | $\geq 4,0 \text{ MPa}$  |
| Sila loma   | 20,3 kN   | $\geq 14,0 \text{ kN}$  |
| Upijanje vode   | 4,6 %   | $\leq 6 \%$   |
| Otpornost na smrzavanje/<br>odmrzavanje sa soli nakon<br>28 ciklusa | $L_{\text{srednje}} = 0,29 \text{ kg/m}^2$<br>$L_{\text{maksimalno}} = 0,38 \text{ kg/m}^2$ | $L_{\text{sr.}} \leq 1,0 \text{ kg/m}^2$<br>$L_{\text{maks.}} < 1,5 \text{ kg/m}^2$ |
| Otpornost na habanje  | 16000 mm <sup>3</sup> /5000 mm <sup>2</sup>   | $\leq 18000 \text{ mm}^3/5000 \text{ mm}^2$   |

Na temelju provedenih ispitivanja može se zaključiti da eksperimentalne šesterokutne prizme s 10 %-tним udjelima zamjene cementa pepelom iz mulja s UPOV-a Zagreb zadovoljavaju osnovne fizikalne i mehanička zahtjeve.

Dodatno je provedeno i ispitivanje izluživanja iz krhotina betona s ugrađenim 10 %-tnim udjelima pepela, a rezultati su prikazani prethodno u tekstu u sklopu tablice 4. Uspoređujući razine izluživanja teških metala iz krhotina betona s ugrađenim pepelom i samog pepela, vidljivo je da je ostvarena značajna inkapsulacija teških metala unutar cementne matrice. Dokaz ove tvrdnje leži u značajno smanjenim koncentracijama izluživanja svih analiziranih elemenata iz krhotina betona u odnosu na izluživanje iz samog pepela. Nadalje, krhotine betona s ugrađenim pepelom mogu se kategorizirati kao inertan otpad u slučaju njihova odlaganja na odlagališta otpada nakon završetka životnog vijeka izrađenih betonskih elemenata. Navedeno također omogućava i eventualno korištenje tih istih elemenata u obliku recikliranog agregata po završetku njihova životnog vijeka.

### 3.2 Ugradnja pepela dobivenog termičkom obradom mulja s UPOV-a u opeku

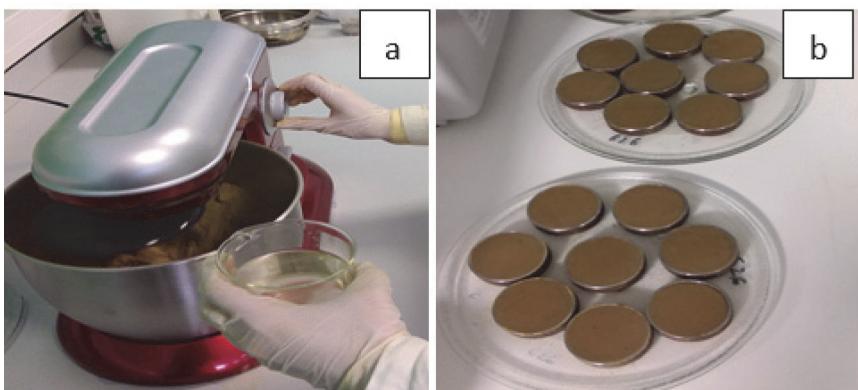
Istraživanje je provedeno u sklopu istraživačkog projekta BRAVOBRICK, koji provodi Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, a financira ga Hrvatska zaklada za znanost. Osnova istraživanja je prikupljanje gline, u konkretnoj fazi istraživanja ustupljene od tvrtke Termoterra iz Topuskog, te stabiliziranog i dehidriranog mulja s UPOV-a Zagreb koji sadrži oko 31-32 %ST. Prikupljeni mulj je podvrgnut procesu mikrovalnog sušenja na inovativnom pilot postrojenju (11x P=800 W, 11x 2,4 GHz) koji je konstruiran u sklopu projekta BRAVOBRICK (slika 12.). Muljevi su ručno ubacivani u sušionik pomoću lopatice te su raspoređeni po površini pokretnе trake u sloju debljine oko 3 cm.



Slika 12. Pilot postrojenje korišteno za mikrovalno sušenje mulja sastoji se od sljedećih jedinica: 1) sustav upravljanja, 2) trofazno električno brojilo, 3) tunelski sušionik koji se sastoji od 11 magnetrona serijski spojenih te postavljenih po dužini tunela, 4) ventilator, 5) cijev za odvođenje kondenzata

Mikrovalno osušen mulja s oko 90 %ST podvrgnut je dalnjem postupku termičke obrade s procesom spaljivanja u električnoj laboratorijskoj peći u trajanju 2.5 h pri temperaturi 850°C (slike 6. do 8.). Kao i kod prethodno opisanog postupka dobivanja pepela za ugradnju u beton (poglavlje 3.1) i u ovom je istraživanju dobiven pepeo u kombinaciji praha te sitnijih i krupnijih granula (slika 7.), te je podvrgnut postupku mljevenja i prosijavanja (slika 8.), kako bi se dobio fini prašasti materijal koji je povoljniji za umješavanje s glinom i proizvodnju opeke.

Dobiveni pepeo, sličnih je karakteristika kao i pepeo prethodno opisan u poglavlju 3.1. Doprsmiljena glina također je osušena je u mikrovalnom sušioniku, a nakon sušenja je samljevena i prosijana kroz sito veličine  $707\text{ }\mu\text{m}$ . Za usitnjavanje gline korišten je višenamjenski laboratorijski mlinac. Sušenjem i mljevenjem te prosijavanjem gline dobiven je praškasti materijal, kao i za pepeo, te je omogućeno učinkovitije miješanje gline i pepela uz dobivanje homogene smjese opeke s ugrađenim pepelom. Miješanje smjese provedeno je pomoću kuhinjskog miješala (slika 13.a). Nakon homogenizacije, smjesa se ručno natiskuje u kalupe (slika 13.b). Opeka se ostavila u kalupima nekoliko sati (do stezanja mase), a zatim se blagim potiskom izdvajala iz kalupa i odležavala još par sati i pripremala se na sušenje. Sušenje opeke se odvijalo u konvekcijskom sušioniku pri  $T=105\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t=24\text{ h}$ . Nakon provedenog sušenja opeka se ostavljala u sušioniku dok se nije ohladila. Pomoću pomičnog mjerila mjerio se promjer opeke, a pomoću analitičke vase mjerila se masa opeke.

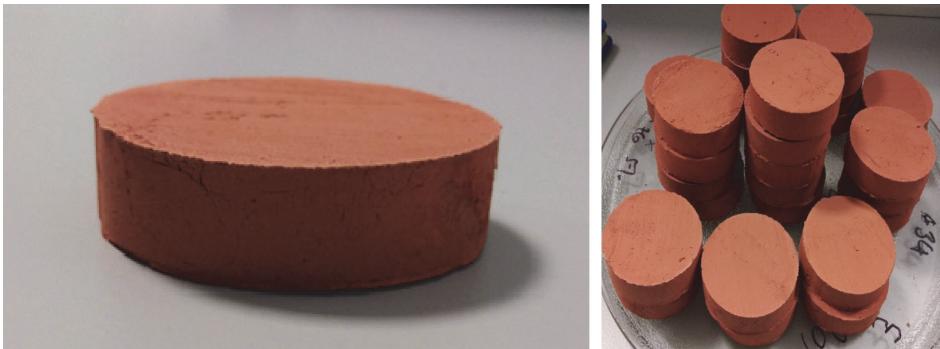


Slika 13. a) Miješanje smjese, b) Oblikovanje opeke

Proizvedeno je 30 opeka u obliku diskova dimenzija: promjer  $d=50\text{ mm}$ , debljina  $s=14\text{ mm}$ , masa  $m=46-48\text{ g}$  (slika 14.). Za proizvodnju navedenih opeka bilo je potrebno oko  $1.600\text{ g}$  gline, pepeo dobiven spaljivanjem mikrovalno osušenog mulja je dodavan u smjesu u masenom udjelu od 5 %. Optimalan udio vode u smjesi je 18 %, no kod ručne izrade opeke potreba za vodom je nešto viša (oko 30 %). Povećanjem udjela zamjenske sirovine (mulja) za glinu smanjuje se obradivost smjese i raste potreba za dodatkom vode.

Sva su ispitivanja provedena na kontrolnoj opeci koja je proizvedena bez dodatka pepela od mulja s UPOV-a, te na opeci s ugrađenih 5 % pepela od mulja s UPOV-a kao zamjene za glinu.

Gubitak žarenjem (LOI vrijednost opeke) je ispitana na kontrolnoj opeci i na opeci s integriranim pepelom. Dodatkom pepela povećala se LOI vrijednost s 5.8 % (kod kontrolne opeke) na 6.76 % (kod opeke s dodanim pepelom).



Slika 14. Proizvedene opeke u obliku diska

Tlačna čvrstoća opeke ispitivana je u Laboratoriju za materijale, Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Tlačna čvrstoća definira se kao otpornost elementa na slom pod određenim opterećenjem. Priprema uzorka i ispitivanje provodilo se prema HRN EN 772-1:2015. Ispitivanje opeke provedeno je na tri uzorka, a rezultati su prikazani u tablici 6. Rezultati potvrđuju da se uz dodatak pepela do 5 % postiže veća tlačna čvrstoća opeke.

Tablica 6. Usporedba tlačnih čvrstoća kontrolne opeke i opeke s dodanim pepelom

| Oznaka uzorka             | Masa [g] |       |       |       | Sila [kN] |       |      | Tlačna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ] |      |      | Aritmetička sredina $\bar{x}$ [N/mm <sup>2</sup> ] | $\sigma$ |
|---------------------------|----------|-------|-------|-------|-----------|-------|------|--------------------------------------|------|------|--|----------|
| Kontrolna opeka           | 46,21    | 47,62 | 46,72 | 83,41 | 70,58     | 88,09 | 52,1 | 44,1                                 | 55,1 | 50,4 | 5,7  |          |
| Opeka s ugrađenim pepelom | 46,80    | 47,35 | 47,57 | 88,85 | 97,24     | 75,57 | 55,5 | 60,7                                 | 47,2 | 54,5 | 6,8  |          |

Ispitivano je i početno upijanje vode na proizvedenoj opeci. Metoda za određivanje početnog upijanja vode propisana je normom ASTM C67/C67M – 20. Veća brzina upijanja vode u vremenu upućuje na veći udio krupnih pora, a time i veću otpornost na cikluse smrzavanja/odmrzavanja. Dodavanjem pepela smanjeno je početno upijanje vode s  $5.9 \text{ g min}^{-1} 200 \text{ cm}^{-2}$  kod kontrolne opeke na  $2.6 \text{ g min}^{-1} 200 \text{ cm}^{-2}$  kod opeke s dodanim pepelom.

Za opečne zidne elemente koji su namijenjeni za upotrebu kao vanjski elementi, provodi se ispitivanje vodoupojnosti prema normi HRN EN 772-21:2011, koje je provedeno i u konkretnom istraživanju. Rezultati prikazuju da se s dodatkom 5 % pepela smanjila vodoupojnost opeke. Vodoupojnost kontrolne opeke iznosila je 20 % (standardna devijacija 4,18 %), a opeke s dodanim pepelom 17 % (standardna devijacija 0,27 %).

Dodatno je ispitano i upijanje vode kuhanjem u skladu s normom HRN EN 772-7:2003. Rezultati prikazuju da se s dodatkom 5 % pepela neznatno povećala vodoupojnost kuhanjem opeke. Vodoupojnost kuhanjem kontrolne opeke iznosila je 17,3 % (standardna devijacija 0,56 %), a opeke s dodanim pepelom 18,1 % (standardna devijacija 0,47 %).

## 4 Zaključak

S naglim porastom broja izgrađenih UPOV-a, problem zbrinjavanja mulja postaje sve aktualniji, a unatoč razmjerne velikom broju različitih tehničko-tehnoloških mogućnosti zbrinjavanja mulja, gotovo svima su svojstveni visoki troškovi. Paralelno s razvojem ove problematike odvija se i značajan broj znanstvenih istraživanja o mogućnostima korištenja mulja i nusprodukata njegove obrade (pepeo) u različitim granama industrije. Značajan udio tih istraživanja baziran je na mogućnostima korištenja pepela dobivenog spaljivanjem mulja kao djelomične zamjene za osnovne sirovine u građevinskoj industriji. Navedeno je rezultat očekivanih pucolanskih svojstava pepela na osnovi kemijskog sastava baziranog na oksidima kalcija, aluminija i silicija, a što je potvrđeno ispitivanjima provedenim i u okviru istraživanja u sklopu znanstveno-istraživačkih projekata na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. S obzirom na prikazane pozitivne rezultate laboratorijskih ispitivanja kao i proizvodnje te ispitivanja u realnom mjerilu u stvarnim privrednim pogonima mogućnosti korištenja pepela dobivenog spaljivanjem mulja s UPOV-a kao zamjene za dio osnovne sirovine u proizvodnji građevinskih materijala (cement, glina) zaključeno je da se s udjelima od 10 % pepela u proizvodnji betonskih zamjenjujući pritom cement, odnosno 5 % u opeci zamjenjujući pritom glinu postižu povoljne karakteristike gotovih proizvoda, odnosno da proizvedeni elementi zadovoljavaju sve analizirane tehničke i ekološke zahtjeve. Na ovaj se način direktno zatvara krug u ostvarenju temeljnih postavki cirkularne ekonomije, budući da se pepeo koji nastaje kao nusproizvod termičke obrade mulja generiranog pročišćavanjem otpadnih voda primjenjuje u proizvodnji novih građevinskih materijala i proizvoda. Uz realnu pretpostavku da bi pepeo industriji građevinskih materijala bio dostupan, uz prihvatljivi iznos naknade za njegovo preuzimanje, te da se njegovim korištenjem smanjuje potreba za sirovim materijalima iz prirode, za očekivati je opravdanost ovakvog postupka i s ekonomskog i s tehničkog i s ekološkog aspekta.

## Zahvala

Ovaj je rad financirala Hrvatska zaklada za znanost u okviru projekata "IP-2019-04-1169-Zbrinjavanje pročišćenih zauljenih otpadnih voda i mulja s UPOV-a u opekarskoj industriji – proizvodnja novog opekarskog proizvoda u okviru kružne ekonomije" i "UIP-11-2013-7927-Reuse of sewage sludge in concrete industry – from microstructure to innovative construction products".

## Literatura

- [1] Barbuta, M., Bucur, R.D. , Cimpeanu, S. M., Paraschiv, G., Bucur, D.: Wastes in Building Materials Industry. In: Pilipavičius, V. , editor. Agroecology [Internet]. London: IntechOpen, 2015 [cited 2022 Nov 23]. Available from: <https://www.intechopen.com/chapters/48142> doi: 10.5772/59933
- [2] Federal Office of Statistics, Building Activity, <https://www.destatis.de>, 23.11..2022.

- [3] Elavarasan, S., Priya, A.K., Kavin Kumar, V.: Manufacturing fired clay brick using fly ash and M – sand, Materials Today: Proceedings, 2020., doi:10.1016/j.matpr.2020.06.042
- [4] Orešković, L.: Ekološka opeka od otpada, GRAĐEVINAR, pp. 937-941, 2016.
- [5] Opeka. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. Pриступljeno 23. 11. 2022. <<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=45225>>.
- [6] Abbas, S., Saleem, M. A., Kazmi, S. M. S., Munir, M. J.: Production of Sustainable Clay Bricks using Waste Fly Ash, Journal of Building Engineering, Vol. 14, pp. 7-14, 2017., doi:10.1016/j.jobe.2017.09.008
- [7] Elavarasan, S., Priya, A. K., Kavin Kumar, V.: Manufacturing fired clay brick using fly ash and M – sand, Materials Today: Proceedings, 2020., doi:10.1016/j.matpr.2020.06.042
- [8] Rajendra Prasad, H. N., Vivek Prasad, H. G., Hamsagar, C.: An Approach for Alternative Solution in Brick Manufacturing, International Journal of Science: Environment and Technology, Vol. 3, 1105-1114, 2014
- [9] Fly Ash, Wikipedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Fly\\_ash](https://en.wikipedia.org/wiki/Fly_ash), 23.11.2022.
- [10] Chen, L., Lin, D.F.: Stabilization treatment of soft subgrade soil by sewage sludge ash and cement. J. Hazard. Mater., 162 (2009) 1, pp. 321–e327.
- [11] Lin, K.L., Chen, B.Y., Chiou, C.S., Cheng, A.: Waste brick's potential for use as a pozzolan in blended Portland cement. Waste Manag. Res. 28 (2010) 7, pp. 647–652.
- [12] Werther, J., Ogada, T.: Sewage sludge combustion. Prog. Energy Combust. Sci. 1999, 25, 55–116. [CrossRef] Urciuolo, M., Solimene, R., Chirone, R., Salatino, P. Fluidized bed combustion and fragmentation of wet sewage sludge. Exp. Therm. Fluid Sci, 43 (2012), 97–104.
- [13] Cheeseman, C.R., Virdi.G.S.. Properties and microstructure of lightweight aggregate produced from sintered
- [14] Merino, I., Arévalo, L.F., Romero, F.: Characterization and possible uses of ashes from wastewater treatment plants, Waste Management, 25 (2005) 10, pp. 1046-1054, <https://doi.org/10.1016/j.watman.2004.12.023>.
- [15] Tenza-abril, A.J., Saval, J.M., Cuenca, A.: Using Sewage-Sludge Ash as Filler in Bituminous Mixes, Journal of Materials in Civil Engineering, 27 (2014) 4, pp. 45-54.
- [16] Dhir, R.K. Ghataora, G.S. Lynn, C.J.: 7 - Geotechnical Applications, Sustainable Construction Materials, Woodhead Publishing, pp. 185-207, 2017.
- [17] Syed-Hapepeo, S.S.A., Wang, Y., Hu, S., Su, S., Xiang, J.: Thermochemical processing of sewage sludge to energy and fuel: Fundamentals, challenges and considerations. Renew. Sustain. Energy Rev., 80 (2017), pp. 888–913.
- [18] Bialecka, B., Adamczyk, Z., Grabowski, J.: Utilization of sewage sludge for the production of selected ceramic construction materials. Ceram. Mater., 53 (2001), pp. 26-30.
- [19] Lynn, J.C., Dhir, R.K., Ghataora, G.S.: Sewage sludge ash characteristics and potential for use in bricks, tiles and glass ceramics, Water Sci Technol, 74 (2016) 1, pp. 17–29.
- [20] Cieślik, B.M., Namieśnik, J., Konieczka, P.: Review of sewage sludge management: Standards, regulations and analytical methods. J. Clean. Prod., 90 (2015), pp. 1–15.
- [21] Ottosen, L.M., Bertelsen, I.M.G., Jensen, P.E., Kirkelund, G.M.: Sewage sludge ash as resource for phosphorous and material for clay brick manufacturing. Constr. Build. Mater. 249, 118684, 2020.
- [22] Nakić, D., Vouk, D., Hozmec, S., Štirmer, N.: Pilot projekt – recikliranje mulja s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda u betonskim proizvodima s primjenom u vodnom gospodarstvu, Hrvatske Vode, 26 (2018) 15, pp.187-194.

- [23] Vouk, D., Nakić, D., Šiljeg, M., Valek Žulj, L., Mandić, V.: Fizikalne i kemijske karakteristike pepela do bivenog spaljivanjem mulja – Izvještaj br.9. Uspostavni istraživački projekt “Reuse of sewage sludge in concrete industry – from microstructure to innovative construction products (RESCUE)”, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2016.
- [24] Vouk, D., Bubalo, A., Nakić, D., Nađ, K.: Termička obrada mulja i ugradnja mulja/pepela u opeku, Aktualna problematika u vodoopskrbi i odvodnji, Hrvatska grupacija vodovoda i kanalizacija, Vodice, pp. 155-172, 2021.



## Važnost sinergije privrede i znanosti u povećanju održivosti zbrinjavanja otpada u okvirima kružnog gospodarstva

Autori:

Izv.prof.dr.sc. Dražen Vouk<sup>1</sup>, Vjekoslav Majetić<sup>2</sup>, Anđelina Bubalo<sup>1</sup>,  
Morana Drušković<sup>2</sup>, Sara Banovec<sup>1</sup>, prof.dr.sc. Nina Štirmer<sup>1</sup>,  
dr.sc. Ivana Carević<sup>1</sup>, dr.sc. Danica Maljković<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb

<sup>2</sup> Indeloop d.o.o., Zagreb

## Važnost sinergije privrede i znanosti u povećanju održivosti zbrinjavanja otpada u okvirima kružnog gospodarstva

Dražen Vouk, Vjekoslav Majetić, Anđelina Bubalo, Morana Drušković, Sara Banovec, Nina Štirmer, Ivana Carević, Danica Maljković

### Sažetak

S ciljem povećanja održivosti zbrinjavanja otpada u okvirima kružnog gospodarstva neminovna je sinergija privrede i znanosti, kojoj se u današnje vrijeme u gotovo svim razvijenim zemljama svijeta pridaje velika važnost. U radu su navedeni primjeri pozitivne prakse u Republici Hrvatskoj, a jedan od njih je detaljnije opisan. Radi se o istraživačkom projektu BRAVOBRICK koji karakterizira sinergija Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i tvrtke Indeloop d.o.o. U radu je opisano kako i sinergija privrede i znanosti kroz jedan istraživački projekt može rezultirati proširenjem vidika te pripremom i realizacijom drugih istraživačkih projekata poput istraživačkog projekta AshCycle koji se provodi u Hoizon Europe okružju.

**Ključne riječi:** kružno gospodarstvo, Građevinski fakultet, Indeloop, BRAVOBRICK, AshCycle, uplinjavanje, mulj

## The importance of the synergy of economy and science in increasing the sustainability of waste disposal within the framework of the circular economy

### Abstract

With the aim of increasing the sustainability of waste disposal within the framework of the circular economy, the synergy of economy and science is inevitable, which nowadays is given great importance in almost all developed countries. The paper lists examples of positive practice in the Republic of Croatia, and one of them is described in more detail. It is a research project BRAVOBRICK, which is characterized by the synergy of the Faculty of Civil Engineering of the University of Zagreb and the company Indeloop d.o.o. The paper describes how the synergy of business and science through one research project can result in the expansion of horizons and the preparation and implementation of other research projects such as the AshCycle scientific project, which is carried out in the Hoizon Europe environment.

**Key words:** circular economy, Faculty of Civil Engineering, Indeloop, BRAVOBRICK, AshCycle, gasification, sewage sludge

## 1 Uvod

Visoka razina onečišćenja, iscrpljivanje prirodnih resursa i narušavanje okoliša posljedica su dosadašnje prakse iskorištavanja prirodnih resursa i neodgovarajućeg zbrinjavanja otpada. Politika gospodarenja otpadom u EU-a sve više promiče koncept kružnog gospodarstva kojim se želi postići održivo i klimatski neutralno gospodarstvo EU-a do 2050. godine.

Osnovni ciljevi vezani uz koncept kružnog gospodarstva vezani su uz uspostavu održivog sustava gospodarenja pojedinim vrstama otpada, proizvodnje što manjih količina otpada, postizanje što niže jedinične cijene zbrinjavanja pojedinih vrsta otpada, materijalna uporaba otpada i nusprodukata njegove obrade i razvoj gospodarstva.

S ciljem povećanja održivosti zbrinjavanja otpada u okvirima kružnog gospodarstva neminovna je sinergija privrede i znanosti, kojoj se u današnje vrijeme u gotovo svim razvijenim zemljama svijeta pridaje velika važnost. Na istom tragu postoje primjeri pozitivne prakse i u Republici Hrvatskoj (RH).

Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu već duži niz godina kroz svoje znanstveno-istraživačke projekte doprinosi implementaciji ovakvog koncepta u hrvatskom gospodarstvu. Jedan od značajnijih primjera je projekt „BRAVOBRICK“ koji se bavi zbrinjavanjem pročišćenih zauljenih otpadnih voda i mulja s UPOV-a u opekarskoj industriji, a koji je financiran od strane Hrvatske zaklade za znanost. Istraživački projekt „BRAVOBRICK“ provodi Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu u periodu 2019.-2024. godine pod voditeljstvom izv.prof.dr.sc. Dražena Vouka i njegovog projektnog tima, a financira ga Hrvatska zaklada za znanost. Projekt BRAVOBRICK između ostalog je i poveznica Sveučilišta u Zagrebu i hrvatske industrije, od kojih se posebice ističe tvrtka Indeloop d.o.o. (sestrinska tvrtka dobro poznate domaće tvrtke Dok-ing d.o.o., svjetski poznatog inovatora Vjekoslava Majetića). Zbog zadovoljavajuće ogrjevne vrijednosti mulja s UPOV-a, koja se najčešće u literaturi uspoređuje s ogrjevnom vrijednošću smeđeg ugljena ili biomase, sve više se energetski uporabljuje u razvijenim zemljama Europe i svijeta. Toplina i energija dobivena procesima izgaranja suhog mulja s razlogom se može smatrati obnovljivim izvorom energije. U posljednje vrijeme sve značajniju ulogu na svjetskoj razini poprima upravo spaljivanje mulja i mogućnost zbrinjavanja dobivenog pepela u raznim područjima. Osim energetske uporabe mulja metodom spaljivanja u posljednje vrijeme sve više pažnje privlači metoda uplinjavanja mulja. Spomenuta tvrtka Indeloop d.o.o. ističe se inovativnom tehnologijom uplinjavanja energetski vrijednih otpadnih materijala, između ostalih i otpadnog mulja s UPOV-a, čije zbrinjavanje i globalno predstavlja iznimski izazov. Navedena tehnologija detaljnije je opisana u ovom radu.

Još jedan atraktivan znanstveno-istraživački projekt koji se trenutno provodi je „AshCycle“ (Integration of underutilized ashes into material cycles by industry - urban symbiosis), koji je započeo u srpnju 2022. godine, sa sjedištem na Sveučilištu Oulu, u Finskoj. Projekt je pod pokroviteljstvom Horizon Europe. Dio ovoga međunarodnog projekta su Građevinski fakultet Sveučilište u Zagrebu uz istaknuta sveučilišta zemalja EU te Švicarske i Južnoafričke Republike (JAR). Tvrтka Indeloop d.o.o. također sudjeluje u ovom projektu kao partner iz industrije uz druge respektabilne domaće i strane tvrtke (Nexe d.d., Beton Lučko d.o.o. i dr.).

Primjer pozitivne prakse je projekt "Innovation Norway" kojeg je glavni nositelj tvrtka DOK-ING d.o.o., Zagreb, a bavi se razvojem MWMGS reaktora kapaciteta 1 tone kojim će se termički obrađivati tekstilni otpad. Konačni cilj ovog projekta je pilot testiranje prototipa MWMGS u suradnji sa Socijalnom zadrugom Humana Nova Čakovec (zadruga za proizvodnju tekstila). Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu također je suradnik na tom projektu, kroz što je ostvarena sinergija privrede i znanosti.

Prethodno su navedeni samo neki od pozitivnih primjera sinergije privrede i znanosti u povećanju održivosti zbrinjavanja otpada u okvirima kružnog gospodarstva, iako je pozitivnih primjera samo u RH i znatno više.

U ovom radu će se detaljnije opisati dosadašnja praksa i dio rezultata ostvarenih kroz istraživački projekt BRAVOBRICK, kao jedan od uspješnijih primjera sinergije privrede i znanosti, čiji su rezultati direktno primjenjivi u gospodarenju muljem s UPOV-a uz što je omogućeno postizanje svih prethodno izdvojenih ciljeva koncepta kružnog gospodarstva. Najprije će se opisati osnovne karakteristike mulja s UPOV-a, od načina njegovog generiranja, preko potencijalnih postupaka obrade, do fizikalnih i kemijskih karakteristika novo nastalih vrsta otpada nakon pojedinih postupaka obrade. Nadalje, poseban osvrт će biti dan na inovativni tehnološki proces obrade mulja koji je razvijen od strane privrede (tvrtke Indeloop d.o.o.) s ciljem dobivanja kvalitetnijeg proizvoda (pepela/čađe) na ekološki prihvatljiviji način i uz minimizaciju troškova obrade, te uz učinkovitiju uporabu kroz ugradnju u opeku boljih svojstava.

## 2 Karakteristike mulja s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda

### 2.1 Generiranje mulja

Mulj koji se generira na uređajima za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV) nastaje kao nus produkt akumulacije krute tvari tijekom fizikalnih (taloženje), bioloških (mikrobiološka aktivnost) i kemijskih procesa (koagulacija, flokulacija). Mulj je složenog sastava i predstavlja mješavinu organskih i anorganskih tvari raspršenih u vodi, a sadržava i patogene mikroorganizme, parazite, viruse te brojne potencijalno toksične elemente i spojeve (teške metale i dr.).

Temeljni ciljevi obrade otpadnog mulja su smanjenje volumena u svakoj fazi obrade radi smanjenja troškova daljnje obrade i transporta obrađenog mulja, ali i nadziranje razgradnje otpadne tvari kako bi se pri konačnom odlaganju spriječili neželjeni utjecaji na okoliš. Smanjenje volumena mulja i povećanje koncentracije suhe tvari (ST) u ovisnosti o postupku obrade mogu se vidjeti u Tablici 1.

Primarni mulj (iz prethodnog taložnika) i biološki (iz naknadnih taložnika) potrebno je adekvatno obraditi na samom uređaju i zbrinuti u skladu sa zakonskom regulativom i propisima.

Postupak obrade mulja poželjno je odrediti u ovisnosti o načinu konačne dispozicije mulja. Ne postoji jedinstven način konačnog zbrinjavanja mulja, a u odnosu na relevantne čimbenike (svojstva otpadne vode, stupanj i tehnologija pročišćavanja otpadne vode, svojstva i količina proizvedenog mulja, kapacitet UPOV, zakonski propisi, mjesne prilike,

troškovi izgradnje i održavanja i dr.) potrebno je za svaki uređaj odabrati način na koji će se mulj konačno zbrinuti.

Odabir optimalnog tehnološkog rješenja obrade mulja na UPOV-u trebao bi proizaći na temelju rezultata detaljno provedenih analiza različitih rješenja i njihovog višekriterijskog rangiranja, uvažavajući pritom ekonomski, tehničko-tehnološki i socijalni kriterij, te kriterij održivosti. U okvirima nastojanja za korištenjem (ili recikliranjem) mulja izuzetno je važno imati u vidu da različite mogućnosti ponovne upotrebe mulja zahtijevaju primjenu određenih postupaka obrade mulja.

Tijek obrade mulja na UPOV-u najčešće prolazi tri osnovne faze:

- zgušnjavanje,
- stabilizacija,
- mehaničko uklanjanje vode.

Zgušnjavanje mulja je proces u kojem se dolazi do smanjenja volumena mulja, kako bi se smanjili troškovi njegove kasnije obrade, kao i troškovi izgradnje objekata koji slijede na liniji mulja. Ovisno o svojstvima mulja i primjenjenom tehnološkom rješenju, zgušnjavanjem se postiže koncentracija suhe tvari u mulju 2-12 % ST.

Stabilizacijom mulja postiže se inhibicija, smanjenje ili eliminacija mogućnosti daljnog truljenja mulja (razgradnje organske tvari uz pomoć mikroorganizama).

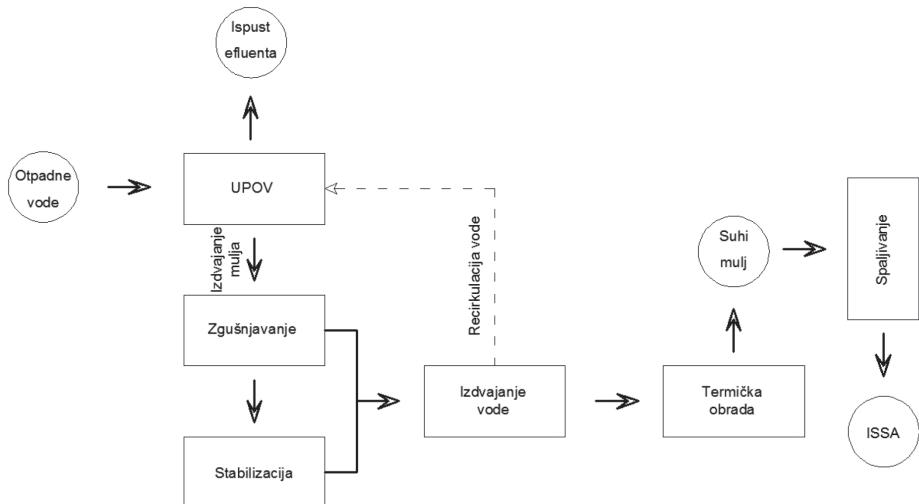
Dehidracija mulja je postupak kojim se iz mulja uklanja sadržaj vode. Dehidracijom se postiže koncentracija suhe tvari u mulju 25-35 % ST. Da bi se dobio kruti mulj s većim sadržajem suhe tvari, te shodno tome manji volumen (i s time manji troškovi daljnog transporta mulja) trebalo bi strojno dodavati vapno dehidriranom mulju.

Uz prethodno izdvojena tri osnovna postupka obrade mulja, izdvajaju se i dodatne faze obrade mulja koje se prema potrebi mogu primijeniti:

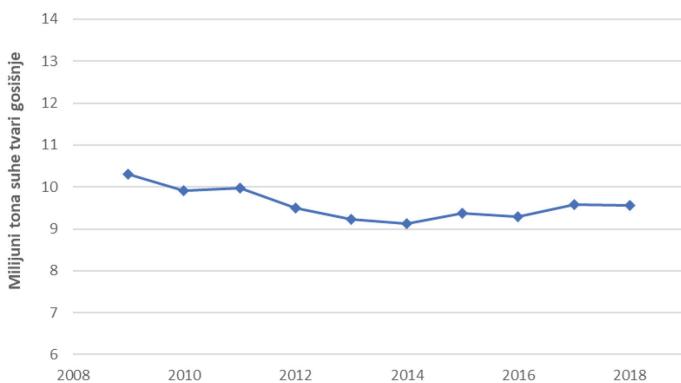
- homogenizacija,
- kondicioniranje,
- sušenje,
- viši stupanj termičke obrade (spaljivanje, uplinjavanje, piroliza)
- dezinfekcija.

U velikom broju zemalja EU značajne količine stabiliziranog i dehidriranog mulja se termički obrađuju na visokim temperaturama (spaljivanje, uplinjavanje, piroliza). Višim stupnjem termičke obrade mulja generira se pepeo (engl. sewage sludge ash - SSA) ili čađa (engl. biochar) pri čemu se volumen mulja smanjuje tri do pet puta što pozitivno utječe na smanjenje troškova njegovog konačnog zbrinjavanja, uz dodatno isticanje mogućnosti korištenja pepela.

Na svjetskoj razini godišnje se proizvode milijuni tona mulja iz procesa obrade otpadnih voda. Kretanje godišnje proizvodnje mulja s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV) na razini EU-27 prikazano je na slici 2.



Slika 1. Shematski prikaz procesa obrade mulja s termičkom obradom i proizvodnjom pepela (SSA)[1]



Slika 2. Godišnja proizvodnja mulja s UPOV-a na razini EU-27 [3]

Prosječna proizvodnja mulja po osobi iznosi od 35 do 85 g suhe tvari (ST)/ES·dan [4]. U Hrvatskoj se prema podacima dostupnim s postojećih UPOV-a ta vrijednost kreće oko 50 do 55 g ST/ES·dan [5]. Provedba Direktive Europskog vijeća o pročišćavanju otpadnih voda 91/271/EEC pokrenula je temeljne promjene u pročišćavanju otpadnih voda [6], a one se očituju u zabrani odlaganja mulja u more i ograničenja glede ispuštanja fosfora i dušika što zahtijeva učinkovitije metode obrade i novu infrastrukturu za rješavanje rastućih količina mulja. Uvođenje sve strožih zahtjeva zakonske regulative u odnosu na kvalitetu pročišćavanja otpadnih voda utječe na neizbjegjan rast proizvodnje mulja. Proizvodnja mulja ne može se minimizirati, iako postoje tehnologije koje smanjuju masu mulja (mehaničko izdvajanje vode iz mulja, sušenje, uklanjanje lakohlapivih spojeva). Izravna uporaba mulja s UPOV-a u poljoprivredne primjene kao gnojivo ili dopuna tlu pogodna je zbog visokog udjela organske tvari (>50 % ) te prisutnosti hranjivih tvari

(primjerice dušika (N) i fosfora (P)) koje mogu poboljšati plodnost tla [7]. No, unatoč prednostima primjene mulja s UPOV-a na poljoprivrednim zemljištima, ova praksa je u određenoj mjeri ograničena zbog okolišnih i zdravstvenih opasnosti uzrokovanih prisutnošću potencijalno toksičnih tvari u mulju [8]. Prisustvo teških metala, elemenata u tragovima, patogenih mikroorganizama i organskih onečišćiva ograničava primjenu mulja kao gnojiva u poljoprivredne svrhe [9], a sukladno zakonskoj regulativi u Hrvatskoj zabranjeno je korištenje mulja na poljoprivredne površine za proizvodnju hrane. Korištenje mulja s UPOV-a kao gnojiva na poljoprivrednim zemljištima zahtijeva korištenje naprednih procesa obrade za potpuno uklanjanje patogena (npr. *E. coli* 0157, *Salmonella* sp., BSE, itd.). Iako je kontaminiranost mulja teškim metalima posljednjih godina konstantna ili čak u opadanju, broj drugih onečišćiva u stalnom je porastu. To podrazumijeva organska onečišćiva poput policikličkih aromatskih ugljikovodika (PAU), dioksina i furana (PCDD/F), polikoloriranih bifenila (PCB), deterđenata, lijekova, proizvoda za osobnu njegu, endokrinih disruptora, sintetskih steroida i patogena [10, 11]. Također, odlaganje mulja s UPOV-a na odlagalištima ograničeno je prema novim zakonima zbog ograničenih zemljišnih resursa i potencijalnih štetnosti na okoliš [12, 13, 14]. Način zbrinjavanja mulja odlaganjem nepoželjan je zbog povećanja emisija stakleničkih plinova te gubitka vrijednih hranjivih tvari prisutnih u mulju. Samo osušeni mulj s UPOV-a omogućuje ekonomičan i ekološki odgovarajući transport. Suhu mulj traženi je izvor energije s pozitivnom bilancem CO<sub>2</sub>. Zaštita okoliša i zdravlja osnovni je preuvjet za bilo koje rješenje zbrinjavanja mulja, a mehanizmi zaštite (standardi, zakonodavstvo, nadzor, provedba, itd.) moraju biti dugoročni učinkoviti.

## 2.2 Karakteristike mulja

Sastav mulja koji se generira na UPOV-ima u značajnoj mjeri ovisi o karakteristikama otpadne vode, tehnološkom procesu pročišćavanja vode i same obrade mulja. Mogućnost recikliranja mulja također u velikoj mjeri ovisi o njegovim fizikalnim karakteristikama i kemijskom sastavu. U tablici 1. se ovisno o pojedinim fazama obrade mulja mogu vidjeti razlike u koncentracijama suhe tvari, ako i smanjenje volumena u odnosu na sirovi mulj (koji izlazi iz prethodnog i naknadnog taložnika) te postotno smanjenje volumena mulja. S aspekta prednosti postupaka termičke obrade mulja i energetskog iskorištavanja, važno svojstvo mulja je i njegova toplinska vrijednost. Ispitivanjem toplinske vrijednosti mulja s UPOV-a Zagreb, dobivene su karakteristične vrijednosti prikazane u tablici 2. U tablici 3. je prikazana prosječna vrijednost sadržaja teških metala u dehidriranom mulju na UPOV Zagreb.

**Tablica 1. Udjeli u pojedinim fazama obrade mulja [1, 2]**

| Parametar                                  | Sirovi mulj | Zgusnuti mulj | Dehidriran mulj | Osušeni mulj | Pepeo/čađa |
|--|-------------|---------------|-----------------|--------------|------------|
| Koncentracija suhe tvari – ST [%]          | 1           | 5             | 25              | 90           | 100        |
| Smanjenje volumena u odnosu na sirovi mulj | 1           | 5             | 25              | 90           | 330        |
| Smanjenje volumena [%]                     | 0           | 80            | 96              | 98,9         | 99,7       |

**Tablica 2. Toplinska vrijednost mulja s UPOV-a Zagreb [1]**

| Parametar                                  | Sirovi mulj | Zgusnuti mulj | Dehidriran mulj | Osušeni mulj | Pepeo/čađa |
|--|-------------|---------------|-----------------|--------------|------------|
| Koncentracija suhe tvari – ST [%]          | 1           | 5             | 25              | 90           | 100        |
| Smanjenje volumena u odnosu na sirovi mulj | 1           | 5             | 25              | 90           | 330        |
| Smanjenje volumena [%]                     | 0           | 80            | 96              | 98,9         | 99,7       |

**Tablica 3. Udjeli teških metala u dehidriranom mulju s UPOV-a Zagreb [1]**

| Parametar | Jedinica    | Prosječna vrijednost | MDK   |
|-----------|-------------|----------------------|-------|
| Kalij     | % mas. s.t. | 0,21                 | -     |
| Krom      | mg/kg s.t.  | 33,11                | <500  |
| Bakar     | mg/kg s.t.  | 235,42               | <500  |
| Cink      | mg/kg s.t.  | 520,25               | <2000 |
| Nikal     | mg/kg s.t.  | 32,57                | <80   |
| Olovo     | mg/kg s.t.  | 65,41                | <500  |
| Arsen     | mg/kg s.t.  | 2,88                 | <20   |
| Živa      | mg/kg s.t.  | 1,25                 | <5    |
| Kadmij    | mg/kg s.t.  | 1,63                 | <5    |
| Kobat     | mg/kg s.t.  | 2,63                 | <100  |
| Molibden  | mg/kg s.t.  | 3,52                 | <20   |
| Selen     | mg/kg s.t.  | 1,31                 | -     |

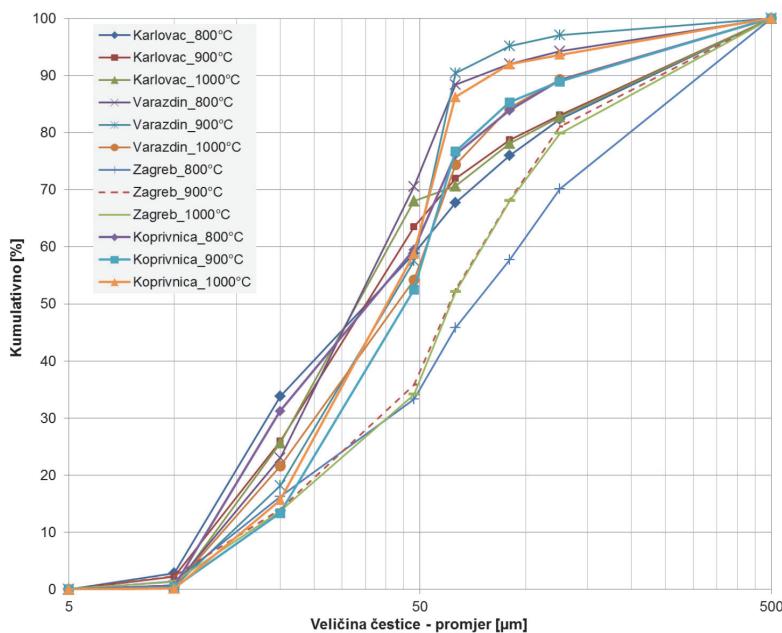
## 2.3 Karakteristike pepela/čađe dobivenog termičkom obradom mulja

Sastav pepela/čađe koja se generira na UPOV-ima u značajnoj mjeri ovisi o karakteristikama otpadne vode, tehnološkom procesu pročišćavanja vode i procesu termičke obrade mulja (spaljivanje, uplinjavanje, piroliza), kao i temperaturi pri kojoj se odvija termička obrada. Mogućnost recikliranja pepela/čađe također u velikoj mjeri ovisi o njegovim fizikalnim karakteristikama i kemijskom sastavu. U tablici 4. dan sastav oksida u pepelu dobivenom termičkom obradom mulja (na dvije različite temperature) s tri različita UPOV-a u RH.

Uobičajeno se za različite vrste obrađenog mulja, a osobito nakon postupka termičke obrade određuje granulometrijski sastav. Na slici 3. je dan prikaz granulometrijskog sastava pepela dobivenog spaljivanjem mulja na različitim temperaturama i s četiri različita UPOV-a u RH.

**Tablica 4. Sastav oksida u pepelu dobivenom termičkom obradom mulja pri različitim temperaturama [1, 15]**

| Izgled uzorka:                 |                       |             | UPOV Karlovac   |        | UPOV Varaždin |        | UPOV Zagreb |        |
|--------------------------------|-----------------------|-------------|-----------------|--------|---------------|--------|-------------|--------|
|                                |                       |             | tamno sivi prah |        | svijetli prah |        | smeđi prah  |        |
| Kemijski spoj                  | Metoda                | Mjerna jed. | 800°C           | 1000°C | 800°C         | 1000°C | 800°C       | 1000°C |
| CaO                            | HRN EN ISO 11885:2010 | %mas.       | 37,64           | 42,12  | 54,85         | 62,40  | 23,51       | 27,00  |
| SiO <sub>2</sub>               |                       | %mas.       | 7,94            | 2,87   | 8,28          | 7,04   | 20,77       | 25,67  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |                       | %mas.       | 16,46           | 11,72  | 1,37          | 1,71   | 7,48        | 8,50   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |                       | %mas.       | 8,21            | 9,46   | 0,91          | 1,01   | 5,72        | 7,02   |
| MgO                            |                       | %mas.       | 4,23            | 4,53   | 1,66          | 1,44   | 2,50        | 3,00   |
| TiO <sub>2</sub>               |                       | %mas.       | 0,76            | 1,03   | 0,12          | 0,15   | 0,36        | 0,52   |
| Na <sub>2</sub> O              |                       | %mas.       | 0,28            | 0,28   | 0,19          | 0,20   | 0,15        | 0,15   |
| K <sub>2</sub> O               |                       | %mas.       | 1,31            | 1,26   | 0,62          | 0,64   | 0,54        | 0,57   |
| SO <sub>3</sub>                |                       | %mas.       | 5,83            | 7,66   | 9,50          | 10,67  | 4,75        | 5,88   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  |                       | %mas.       | 16,02           | 17,21  | 10,25         | 11,98  | 10,40       | 11,98  |
| Ostalo                         | računski              | %mas.       | 1,34            | 1,87   | 12,25         | 2,76   | 23,82       | 9,70   |



Slika 3. Granulometrijski sastavi pepela dobivenih termičkom obradom mulja s UPOV-a u RH [16]

### 3 Postupci termičke obrade mulja

Tehnologije termičke obrade nisu nove jer su razvijene komercijalno za druge vrste goriva, međutim razlike u fizikalnim i kemijskim svojstvima mulja predstavljaju jedinstvene tehničke izazove koji utječu na proces i iskorištanje energije. To se posebice odnosi na termo-kemijske procese koji se koriste za kruta goriva poput ugljena i biomase. Mulj u odnosu na biomasu i ugljen karakterizira visok udio vlage, dušika i teških metala. Zahvaljujući hlapljivom organskom udjelu koji se kreće od 21–48 %, ogrjevna vrijednost stabiliziranog i dehidriranog mulja s UPOV-a koji se navodi u literaturi varira između 10–22,10 MJ/ kg, što ukazuje na jednake ili veće vrijednosti u odnosu na lignit i razne druge uzorke biomase [17, 18, 19].

Najraširenija i najzastupljenija tehnologija termičke obrade je spaljivanje, dok su piroliza i uplinjavaju inovativne tehnologije u razvoju. Brza i kontrolirana razgradnja ≥80 % organske tvari u inertnoj, djelomično oksidacijskoj ili oksidacijskoj atmosferi jedna je od glavnih prednosti ovih termičkih procesa u usporedbi s anaerobnom razgradnjom [20]. Uvođenje oporabe topline tradicionalno spaljivanje pretvara u tipičan sustav sagorijevanja koji iskorištava toplinu iz dimnih plinova dobivenih nakon potpune oksidacije organske tvari pri visokim temperaturama (800–1150°C). Oslobođena toplina koristi se za grijanje tekućine (obično vode) koja se može koristiti izravno grijanjem ili za proizvodnju električne energije pomoću parne turbine.

Spaljivanjem mulja oslobađa se toplina, ugljikov dioksid, vodena para i drugi plinovi u tragovima. Pepeo i dimni plinovi glavni su nusproizvodi iz procesa spaljivanja. Dimni

plinovi sastoje se ponajprije od oksida ugljika, dušika, sumpora i lebdećih čestica koje djeluju kao termalna skladišta koja omogućuju prijenos topline na vodu. Nakon procesa uporabe topline, dimni plinovi se moraju podvrgnuti obradi uklanjanja onečišćujućih tvari prije ispuštanja (uglavnom  $\text{CO}_2$  i vodene pare) u atmosferu. Takva sustavi moraju biti opremljeni postrojenjima za pročišćavanje dimnih plinova kako bi se smanjile emisije lebdećeg pepela i emisije opasnih plinova.



Slika 4. Proces spaljivanja mulja

Spaljivanje je tehnologija koja zahtjeva veliki utrošak energije i trenutno je ekonomski opravdana za velike gradove. U javnosti nije dobro prihvaćena zbog zabrinutosti oko emisija plinova i dobivanje suglasnosti za izgradnju novih spalionica je često vrlo teško. Da bi bilo prihvatljivo u smislu hijerarhije gospodarenja otpadom, spaljivanje se mora obavljati auto-termički - tj. potrebno je ukloniti dovoljno vode mehaničkim postupcima i termičkim sušenjem, tako da će mulj izgorjeti bez upotrebe pomoćnog goriva. Iako je to tehnički moguće, relativno malo modernih spalionica mulja zapravo osigurava povrat energije, osim one koja je potrebna za odvijanje procesa (samoodrživost procesa), vjerojatno zbog troškova i trenutne relativno niske cijene energije. Međutim, u tehnološki razvijenim zemljama sve više se koristi mulj (i drugi organski otpad) u elektranama ili u proizvodnji cementa kao zamjena za gorivo. Upotreba mulja s drugim gorivima poput ugljena, biomase, drugog čvrstog otpada, loživog ulja ili plina istražena je kao sredstvo za izbjegavanje visokih troškova povezanih s namjenskim reaktorima, smanjenje emisije ugljika iz elektrana na ugljen, povećanje kalorijske vrijednosti i/ili poboljšanje energetske učinkovitosti sustava [21]. Također, ostali komunalni otpad, poput dvorišnog otpada i otpada iz parkova, ostataka iz procesa kompostiranja, može se suspaljivati sa suhim muljem. U tim se slučajevima treba kritički proučiti tehnička i ekomska održivost, s pažnjom na utjecaj suspaljivanja na operativnu učinkovitost, stvaranje onečišćivala, emisiju dimnih plinova i pitanja zbrinjavanja pepela kako bi se ispunili prihvatljivi standardi za energiju, okoliš i financijsku održivost tijekom njegovih faza prerade. Kogenerirana električna i toplinska energija (engl. Combined Heat and Power ili CHP) termičke obrade mulja spaljivanjem na UPOV-ima koristi se za rad sušionika. Spaljivanje je zapravo samo način minimiziranja mulja (oko 85 %), no ono ne predstavlja potpuno rješenje zbrinjavanja mulja jer 30 % suhe tvari ostaje kao pepeo. Pepeo je klasificiran kao neopasan ili opasan otpad u ovisnosti o sadržaju teških metala i drugih elemenata na temelju kojih se klasifikacija provodi pa s njim nastaju daljnji troškovi zbrinjavanja na posebnim odlagalištima. Međutim, postoje mogućnosti za korištenje pepela, primjerice izdvajanje fosfora (P) iz pepela te u proizvodnji građevinskih materijala i na poljoprivrednim i nepoljoprivrednim površinama, a kada se mulj koristi kao gorivo u proizvodnji cementa ili opeke, pepeo postaje sastavni dio proizvoda.

Za razliku od spaljivanja/izgaranja, piroliza se odvija u potpuno inertnoj atmosferi (bez kisika) na umjerenim do visokim temperaturama (300–900 °C) pri čemu se stvara piroličko gorivo, biopljin i netopljivi plinovi ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  i laki ugljikovodici) [22]. Operativna temperatura, brzina zagrijavanja i vrijeme zadržavanja uvelike utječu na raspodjelu i energetski sadržaj piroličkih proizvoda. Dobiveno biogorivo se može dodatno poboljšati i koristiti kao tekuće gorivo ili preraditi u sintezni plin ( $\text{CO}$  i  $\text{H}_2$ ) za proizvodnju kemičalija, dok se biougljen, netopljivi plinovi i biogorivo mogu također koristiti kao kruta, plinovita i tekuća goriva za proizvodnju električne i toplinske energije sagorijevanjem. Alternativno se bio ugljen može upotrijebiti za adsorpciju ili kao katalizator.



Slika 5. Proces pirolize mulja

Uplinjavanje podrazumijeva termo kemiju pretvorbu organskih spojeva djelomičnom oksidacijom pri visokim temperaturama (650-1000 °C) za maksimiziranje plinovitih produkata ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$  i lakih ugljikovodika), posebno sinteznog plina ( $\text{CO}$  i  $\text{H}_2$ ) [23]. Ogrjevna vrijednost proizvedenih plinova varira od 4 do 28 MJ/Nm<sup>3</sup> što ovisi o sredstvu za uplinjavanje i temperaturi. Dobiveni plin može se preusmjeriti u razne svrhe, poput izravnog sagorijevanja u toplinsku i električnu energiju pomoću kombiniranog ciklusa plinske turbine ili daljnje poboljšanje i pretvorba sinteznog plina u tekuće gorivo ili za proizvodnju kemičalija iz plina u kapljevinu procesima poput Fischer-Tropschov postupka.

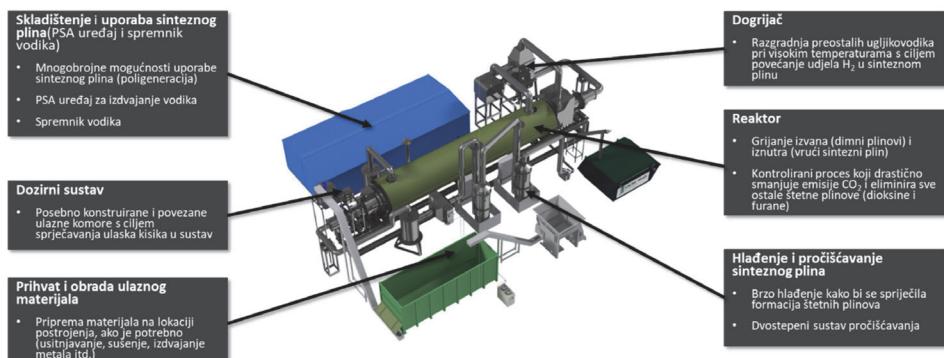


Slika 6. Proces uplinjavanja mulja

## 4 Inovativni razvoj postupka termičke obrade mulja

Proces uplinjavanja karakterizira djelomična oksidacija. Inovativna tehnologija uplinjavanja koju je razvila tvrtka Indeloop d.o.o. odlikuje se posebnom izvedbom horizontalno rotirajućeg cijevnog reaktora (slika 7. i slika 8.).

Proces se odvija bez uporabe katalizatora i vodene pare. Glavni produkt uplinjavanja mulja je sintezni plin (slika 6). Sintezni plin smjesa je prvenstveno dvaju plinova vodika i ugljikovog monoksida. Proces dobivanja sinteznog plina iz mulja dobar je primjer danas sve aktualnijih vodikovih tehnologija. Popularizacija i uvođenje vodikovih tehnologija u industrijske procese sve više nalaže politika EU, gdje je dobivanje čiste energije imperativ. Osim produkta sinteznog plina procesom uplinjavanja nastaje i kruti nusprodukt – pepeo/čađa. Tradicionalni postupci odlaganja mulja s UPOV-a rasprostiranjem na prostranim zemljишima ili u površinskim vodnim tijelima (mora i dr.) su zabranjeni ili se sve više ograničavaju s implementacijom novih legislativa koje idu u smjeru zaštite okoliša i održivog razvoja.



Slika 7. Shematski prikaz inovativnog postrojenja tvrtke Indeloop d.o.o. - Looper



Slika 8. Inovativno postrojenje tvrtke Indeloop d.o.o. - Looper

Inovacija prethodno prikazanog i opisanog postrojenja Looper ogleda se u sljedećem:

- Razdvajanje reaktora i pregrijača-povećanje energetske učinkovitosti i proizvodnje vodika.
- Zagrijavanje reaktora sinteznim plinom koji struji kroz šuplji pužni transporter-visoka energetska učinkovitost.
- Iskorištavanje otpadne topline u razne svrhe kao što je sušenje ulazne sirovine ili grijanje.

Mali udio proizvedenog čistog sinteznog plina bogatog vodikom (otprilike 28-30 % proizvedenog volumena plina) koristi se za zagrijavanje pregrijača i reaktora.

Iz ostatka sinteznog plina (preostalih 70 % proizvedenog plina) može se proizvoditi energija ili se sintezni plin može koristiti za druge svrhe npr. proizvodnju čistog vodika. Proizvedeni sintezni plin sadrži oko 45-60 % čistog, održivog vodika. On se može koristiti za rad kemijskih postrojenja, transport i drugo. Sintezni plin može se koristiti i za proizvodnju toplinske i električne energije.

Materijalna uporaba otpadnih materijala kao što su mulj s UPOV-a i pepeo/čađa koji nastaje kao nusproizvod termičkih metoda može rezultirati proizvodnjom novih građevinskih proizvoda (poglavlje 5).

Procesom uplinjavanja nastaje i tekući nusprodukt, a to su otpadne vode iz procesa mokrog pročišćavanja sinteznog plina (engl. wet scrubbing). Mokrim pročišćavanjem uklanaju se nečistoće iz sinteznog plina - krute čestice (pepeo, neizgoreni ostatci, čađa) i plinovi topljivi u vodi te katran (smjesa viših ugljikovodika i njihovih spojeva). Predmet trenutnih i budućih istraživanja, kroz sintezu privrede i znanosti, je pročistiti zaumljene otpadne vode do kakvoće koja će omogućiti njihov ispuštanje u okoliš u skladu s propisanim graničnim vrijednostima ili za korištenje kao tehnološke vode u procesu proizvodnje novih proizvoda (građevinskih i dr.). Korištenje pročišćene vode, te pepela (mulja) ulazi u okvire kružne ekonomije s mogućnošću dobivanja novih proizvoda konkurentnijih na tržištu.

Inovativno postrojenje tvrtke Indeloop d.o.o. (Looper) korišteno je i koristi se i dalje za potrebe provođenja istraživačkog projekta BRAVOBRICK, za potrebe uplinjavanja mulja s UPOV-a te dobivanja pepela/čađe koji se dalje koristi u proizvodnji inovativnih opeka, kao zamjena za dio gline kao prirodнog resursa. Uspješna suradnja privrede i znanosti, primjerice kroz projekt BRAVOBRICK, rezultirala je otvaranjem novih vidika i daljnje suradnje u pripremi i realizaciji drugih sličnih istraživačkih projekata poput projekta Ach-Cycle, pod pokroviteljstvom Horizon Europe. Dio tog međunarodnog projekta su Građevinski fakultet Sveučilište u Zagrebu uz istaknuta sveučilišta zemalja EU te Švicarske i Južnoafričke Republike (JAR), te tvrtka Indeloop d.o.o. s postrojenjem Looper na kojem će se dobivati pepeo koji će se koristi u proizvodnji inovativnih građevinskih proizvoda od opeke i betona. Time se dodatno širi suradnja i na ostale privredne grane poput građevinske industrije (Termoterra d.o.o., Nexe d.d., Wienerberger d.o.o., Beton Lučko d.o.o. i dr.).

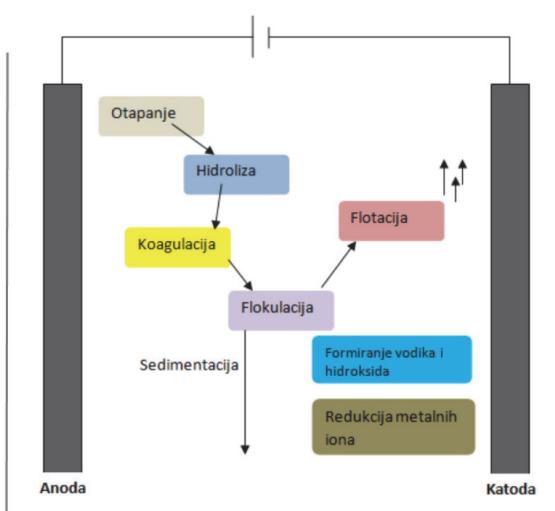
## 5 Inovativni razvoj postupka pročišćavanja otpadne vode iz mokrog skrubera za pročišćavanje dimnih plinova

Dodatna sinergija privrede i znanosti kroz provođenje istraživačkog projekta BRAVO-BRICK ogleda se kroz suradnju Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i tvrtke Indeloop d.o.o. koja ima za cilj razvoj i optimizaciju hibridnog elektrokemijskog procesa pročišćavanja otpadnih voda. Naime, u postupku uplinjavajućeg mulja s UPOV-a (na postrojenju Looper) pročišćavaju se dimni plinovi korištenjem tehnologije mokrog skrubera. Otpadna voda iz uređaja za pročišćavanje dimnih plinova okarakterizirana je kao zauljena otpadna voda mineralnog porijekla koju je potrebno pročistiti prije ispusta ili u okoliš ili u sustave javne odvodnje, a sukladno zakonskoj regulativi.

Optimizacija hibridnog elektrokemijskog procesa pročišćavanja zauljene otpadne vode mineralnog porijekla sastavni je dio istraživačkog projekta BRAVOBRICK.

Između ostalih izvora zauljene otpadne vode (npr. separatori ulja i masti, otpadna voda od pranja tankova naftne industrije i dr.), ista se za potrebe provođenja projekta BRAVO-BRICK prikuplja u tvrtki Indeloop d.o.o., kao otpadna voda iz mokrog skrubera postrojenja Looper. Zauljena otpadna voda se zatim doprema do hidrotehničkog laboratorijskog pilotnog hibridnog elektrokemijskog uređaja, na kojem se ujedno vrši i optimizacija primjenjenog procesa pročišćavanja. Primjenjeni proces temelji se na kombinaciji elektro-Fenton procesa i elektrokoagulacije.

Elektrokemijski postupci ne razlikuju se po mehanizmu pročišćavanja, nego po tome što se potrebne tvari za provođenje postupka generiraju *in situ*, u reakcijskoj posudi dizajniranoj kao elektrokemijska ćelija (slika 9). U reakcijskoj posudi (elektrokemijskom reaktoru) pod utjecajem električnog polja iz anoda oslobađaju se kationi (npr.  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ) potrebni za postupak koagulacije onečišćenja prisutnih u vodi uz istodobnu oksidaciju vode u kisik i  $\text{H}^+$  ione. Istodobno na katodi dolazi do redukcije vode, pri čemu nastaje vodik i  $\text{OH}^-$  ioni. Reakcijom kationa i  $\text{OH}^-$  iona nastaju stabilni hidroksidi željeza i aluminija. Uklanjanje suspendiranih i otopljenih nečistoća obavlja se koagulacijom pomoću elektrokemijski stvorenih kationa željeza i aluminija, sataloženjem s hidroksidima željeza i aluminija te taloženjem odgovarajućih hidroksida metala. Na slici 10. je prikazan pilot hibridni elektrokemijski uređaj za pročišćavanje otpadnih voda koji je korišten u ovom istraživanju. Pritom su korištene elektrode od nehrđajućeg čelika, željeza i aluminija.

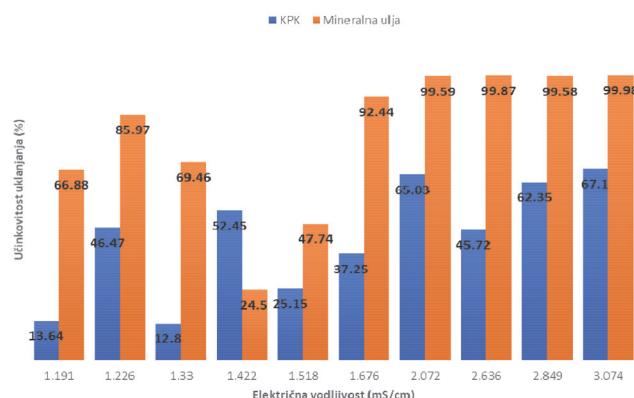


Slika 9. Shematski prikaz primjenjenog elektrokemijskog procesa pročišćavanja otpadnih voda



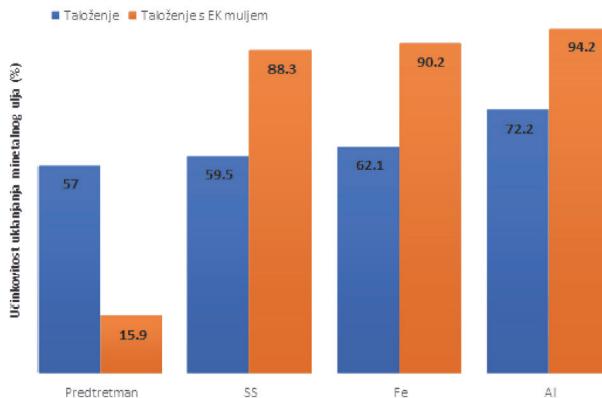
Slika 10. Pilot hibridni elektrokemijski uređaj za pročišćavanje otpadnih voda s primijenjenim elektrodama od nehrđajućeg čelika, željeza i aluminija

Proces optimizacije procesa svodio se na ispitivanje utjecaja različitih tehnoloških parametara poput materijala elektrode, vremena reakcije na pojedinoj vrsti elektroda (5 – 60 minuta), jakosti struje (5-150 A), pH sirove vode (4-9), električna vodljivost sirove vode, dodatno obogaćivanje vode kisikom i ozonizacija, utjecaj predtretmana (taloženje prije elektrokemijskog pročišćavanja (s povratnim tokom mulja i bez njega) i dr. Dio rezultata istraživanja s učinkovitosti uklanjanja KPK i mineralnih ulja u ovisnosti o različitim vrijednostima električne vodljivosti sirove otpadne vode, prikazan je u nastavku na slici 11.



Slika 11. Učinkovitost primijenjenog hibridnog elektrokemijskog pročišćavanja zauljenih otpadnih voda iz mokrog skrubera pri različitim električnim vodljivostima sirove otpadne vode

Na slici 12. je prikazana učinkovitost uklanjanja mineralnih ulja iz iste zaobljene otpadne vode, u ovisnosti o primjeni različitih postupaka predtretmana sirove otpadne vode.



Slika 12. Učinkovitost primjenjenog hibridnog elektrokemijskog pročišćavanja zaobljenih otpadnih voda iz mokrog skrubera pri različitim postupcima predtretmana sirove otpadne vode

## 6 Korištenje pepela/čađe iz procesa termičke obrade mulja

Današnji trend na svjetskoj razini predstavlja iznalaženje tehnički i ekonomski izvedivih načina primjene, odnosno korištenja pepela/čađe. Iz dosadašnje svjetske prakse proizlazi više mogućih rješenja recikliranja pepela/čađe, među kojima se ističe sljedeće:

1. Korištenje u poljoprivredi
2. Izdvajanje fosfora
3. Korištenje u građevinarstvu:
  - u funkciji poboljšanja tla,
  - pri izgradnji prometnica,
  - u opekarskoj industriji,
  - u betonskoj industriji.

Među svim navedenim načinima korištenja pepela/čađe iz današnje perspektive najinteresantnije je korištenje u građevinarstvu.

Svjetski trend predstavlja i razvoj tehnologija za izdvajanje fosfora iz pepela/čađe, zbog ograničenih prirodnih rezervi rude iz koje se vadi fosfor. S dalnjim razvojem tehnologija za izdvajanje fosfora iz pepela dobivenog termičkom obradom mulja, očekuje se smanjenje jedinične cijene fosfora dobivenog tim metodama, dok se s druge strane s dalnjim smanjenjem količine rude iz koje se vadi fosfor očekuje porast jedinične cijene fosfora dobivenog iz rude.

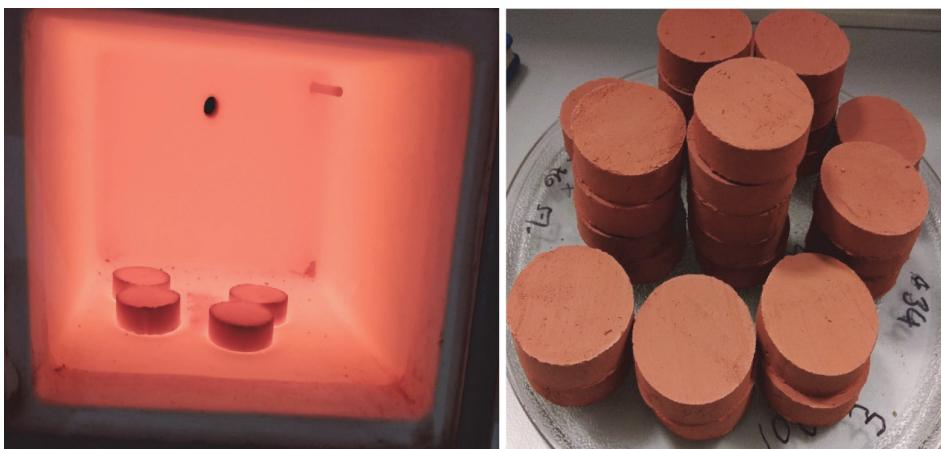
## 6.1 Primjena pepela/čađe u proizvodnji opeke

Proizvodnja pečene glinene opeke iz otpada praktičan je primjer industrijske simbioze. Princip industrijske ekologije temelji se na oponašanju prirodnih ekosustava gdje se otpad ili nusproizvod jednog procesa koristi kao sirovina za drugi proces. Keramički proizvodi dizajnirani za dobivanje korisnih proizvoda za različite primjene poput opeke, crijeva i keramike smatraju se dobrim potencijalnim dionicima za recikliranje otpada. Korištenjem pepela/čađe dobivene termičkom obradom mulja u proizvodnji opeke smanjuje se pritisak na korištenje gline kao prirodnog resursa.

Zbog industrijskog podrijetla otpada, njegovu ugradnju u keramičke procese treba procijeniti s cjelovitog gledišta, emisije tijekom pečenja, tehnološka i okolišna svojstva, kao i trajnost ovih novih materijala. Štoviše, ovo uzima u obzir da su Uredba o građevinskim proizvodima (CPR) i Deklaracija o okolišnim proizvodima (EPD) osnovni zahtjevi za održivost koji definiraju relevantne i specifične informacije o proizvodu i utjecajima na okoliš tijekom cijelog životnog ciklusa. Pepeo/čađa dobiveni termičkom obradom mulja s UPOV-a mogu imati ulogu zamjenskog materijala za glinu zbog određenog udjela minerala koji daju plastičnost keramičkoj matrici.

Dosadašnja istraživanja pokazala su opravdanost proizvodnje opekarskih materijala s dodanim pepelom/čađom. Dio tih istraživanja se provodi i u Hrvatskoj, u sklopu istraživačkog projekta BRAVOBRICK. Dosadašnji rezultati projekta BRAVOBRICK pokazali su da je opravdano koristiti i do 10 % pepela/čađe kao zamjene za glinu u proizvodnji opeke, uz dobivanje opeke zadovoljavajućih fizikalnih i mehaničkih svojstava.

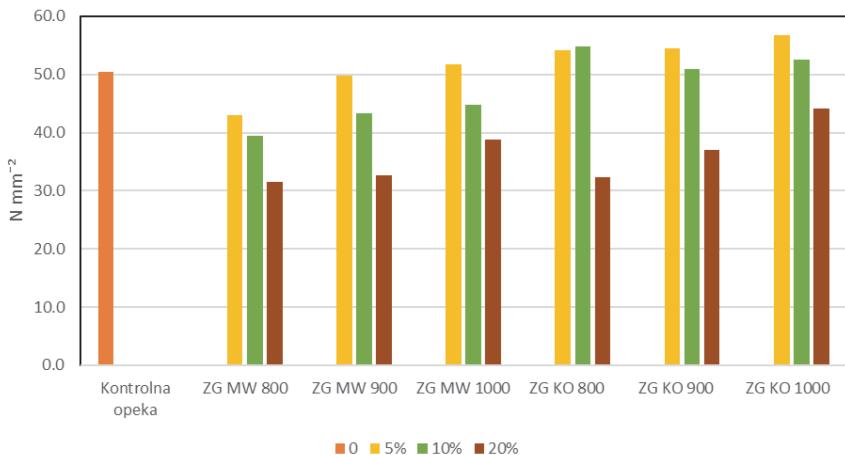
U hidrotehničkom laboratoriju, Građevinskog fakulteta, Sveučilišta u Zagrebu provedena je laboratorijska proizvodnja opeke (pune) s masenim udjelom od 5 % i 10 % pepela (slika 13). Za potrebe eksperimenta korištena je glina ustupljena od tvrtke Termoterra iz Topuskog. Korišteni su pepeli iz procesa termičke obrade muljeva s UPOV-a Zagreb (ZG) dobiveni na inovativnom postrojenju tvrtke Indeloop d.o.o. - Looper. Mulj je prethodno osušen u konvekcijskom sušioniku pri  $T=105^{\circ}\text{C}$ ,  $t=24\text{ h}$ , zatim je uplinjen na postrojenju Looper.



Slika 13. Opeka proizvedena u laboratorijskim uvjetima u obliku diska

Tlačna čvrstoća opeke ispitivana je u Laboratoriju za materijale, Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Tlačna čvrstoća definira se kao otpornost elementa na slom pod određenim opterećenjem. Priprema uzorka i ispitivanje provodi se prema HRN EN 772-1:2015.

Ispitivanje opeke provedeno je na većem broju uzoraka, a rezultati su prikazani na slici 14. Rezultati potvrđuju da se pri udjelu različitih pepela dobivenih uplinjavanjem na različitim temperaturama do 5 % i do 10 % zamjene gline, postiže tlačna čvrstoća proizvedene opeke koja je jednaka ili veća od tlačne čvrstoće kontrolne opeke bez dodanog pepela.



Slika 14. Tlačna čvrstoća opeke s ugrađenim pepelom/čađom dobivenim termičkom obradom mulja s UPOV-a Zagreb

## 7 Zaključak

Sinergija privrede i znanosti s ciljem povećanja održivosti zbrinjavanja otpada u okvirima kružnog gospodarstva je osnovna pokretačka snaga, kojoj se u današnje vrijeme u gotovo svim razvijenim zemljama svijeta pridaje velika važnost. Postoje i brojni primjeri pozitivne prakse u Republici Hrvatskoj, od kojih su neki i navedeni u radu, dok je detaljnije opisana sinergija privrede i znanosti uspostavljena i u realizaciji kroz istraživački projekt BRAVOBRICK koji karakterizira sinergija Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i tvrtke Indeloop d.o.o. Apostrofirano je kako potrebe privrede (gospodarstva) mogu poticati pripremu znanstveno-istraživačkih projekata i njihovu prijavu za financiranje iz različitih fondova (EU i dr.). Također je naglašena prednost te sinergije kroz razvoj inovativnih tehnologija (npr. postrojenje za uplinjavanje otpada, uređaj za pročišćavanje otpadnih voda) i inovativnih proizvoda (npr. građevinski proizvodi s ugrađenim otpadom uz istovremeno smanjenje korištenja prirodnih resursa). U radu su istaknute i pozitivne okolnosti vezane uz sinergiju privrede i znanosti na pojedinim istraživačkim projektima čiji rezultati mogu poslužiti za pripremu i realizaciju dodatnih istraživačkih projekata, kao što je primjer projekata BRAVOBRICK i AshCycle, koji se provode na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, u suradnji s tvrtkom Indeloop d.o.o.

## Zahvala

Ovaj je rad financirala Hrvatska zaklada za znanost u okviru projekta "IP-2019-04-1169-Zbrinjavanje pročišćenih zauļjenih otpadnih voda i mulja s UPOV-a u opekarskoj industriji – proizvodnja novog opekarskog proizvoda u okviru kružne ekonomije".

## Literatura

- [1] Vouk, D., Bubalo, A., Nakić, D., Nađ, K., Kollar, R.: Fizikalne i kemijske karakteristike mulja – Izvještaj br. 9, BRAVOBRICK – HRZZ-IP-2019-04-1169, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, pp. 1-14, 2022.
- [2] Vouk, D., Malus, D., Tedeschi, S.: Muljevi s komunalnih uređaja za pročišćavanje otpadnih voda, GRAĐEVINAR, 63 (2011) 4, 2011.
- [3] Vouk, D., Bubalo, A., Nakić, D., Nađ, K.: Termička obrada mulja i ugradnja mulja/pepela u opeku, Aktualna problematika u vodoopskrbi i odvodnji, Vodice, pp. 155-172, 2021.
- [4] Jamshidi, A., Mehrdadi, N., Jamshidi, M.: Application of Sewage Dry Sludge as Fine Aggregate in Concrete Journal of Environmental Studies, 37 (2011) 59.
- [5] Nakić, D., Vouk, D., Serdar, M., Cheeseman, C.: Use of MID-MIX® treated sewage sludge in cement mortars and concrete, European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2018.
- [6] EC (European Commission), 1999. Implementation of Council Directive 91/271/EEC of 21 May 1991 concerning urban waste water treatment, as amended by Commission Directive 98/15/EC of 27 February 1998, COM(98)775 final, Brussels 15.01.1999 (10) (PDF) Comparative Study of the Methods Used for Treatment and Final Disposal of Sewage Sludge in European Countries. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=legissum:l28008> [accessed Oct 01 2021].
- [7] Samolada, M.C., Zabaniotou, A.A.: Comparative assessment of municipal sewage sludge incineration, gasification, and pyrolysis for a sustainable sludge-to-energy management in Greece. Waste Management, 34 (2014) 2, pp. 411–420.
- [8] Dean, R., Suess, M.: The risk to health of chemicals in sewage sludge applied to land, Waste Management Resources, 3 (1985), pp. 251-278.
- [9] Frišták, V., Pipiška, M., Soja, G.: Pyrolysis treatment of sewage sludge: A promising way to produce phosphorus fertilizer. Journal of Cleaner Production, 172 (2018), pp. 1772–1778.
- [10] Roskosch, A., Heidecke, P., Bannick, C.G., Brandt, S., Bernicke, M., Dienemann, C., Gast, M., Hofmeier, M., Kabbe, C., Schwirn, K., Vogel, I., Volker, D., Wiechmann, B.: Klarschlammensorgung in der Bundesrepublik Deutschland. Umweltbundesamt, Berlin, Germany, 2018.
- [11] Hudcová, H., Vymazal, J. , Rozkošný M.: Present restrictions of sewage sludge application in agriculture within the European Union, Soil and Water Research, 14 (2019) 2, pp. 104–120.
- [12] Cieslik, B.; Konieczka, P.: A review of phosphorus recovery methods at various steps of wastewater treatment and sewage sludge management. The concept of "no solid waste generation" and analytical methods. J. Clean. Prod. 142 (2017), pp. 1728–1740.
- [13] Karayildirim, T., Yanik, J., Yuksel, M. Bockhorn, H.: Characterisation of products from pyrolysis of waste sludges. Fuel 85 (2006), pp. 1498-1508.
- [14] Soria-Verdugo, A., Goos, E., Morato-Godino, A., García-Hernando, N., Riedel, U.: Pyrolysis of biofuels of the future: Sewage sludge and microalgae – Thermogravimetric analysis and modelling of the pyrolysis under different temperature conditions, Energy Conversion and Management. 138 (2017), pp. 261–272.

- [15] Vouk, D., Serdar, M., Nakić, D., Anić-Vučinić, A.: Korištenje mulja s UPOV-a u proizvodnji cementnog morta i betona, GRAĐEVINAR, 68 (2016) 3, pp. 199-210, <https://doi.org/10.14256/JCE.1374.2015>
- [16] Vouk, D., Nakić, D., Šiljeg, M., Valek Žulj, L., Mandić, V.: Fizikalne i kemijske karakteristike pepela dobivenog spaljivanjem mulja – Izvještaj br. 9, RESCUE – HRZZ-UIP-2013-7297, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, pp. 1-18, 2016.
- [17] Syed-Hassan, S.S.A.; Wang, Y.; Hu, S.; Su, S.; Xiang, J. Thermochemical processing of sewage sludge to energy and fuel: Fundamentals, challenges and considerations. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 80 (2017), pp. 888–913.
- [18] Tsai, W.T.: An Analysis of Waste Management Policies on Utilizing Biosludge as Material Resources in Taiwan, *Sustainability*, 4 (2012), pp. 1879-1887.
- [19] Donatello, S., Cheeseman, C., Tyrer, M., Biggs, A.: Sustainable construction products containing sewage sludge ash., Department of Civil and Environmental Engineering, South Kensington campus, Imperial College London, SW7 2AZ. \*Akristos Ltd., Innovation Centre 1, Keele University Business Park, Keele, Staffordshire, ST5 5NB, 2004.
- [20] Ruffino, B., Campo, G., Cerutti, A., Zanetti, M.C., Scibilia, G., Lorenzi, E., Genon, G.: Enhancement of waste activated sludge (WAS) anaerobic digestion by means of pre- and intermediate treatments. Conference on Sustainable Solid Waste Management, 2017.
- [21] Wang, Z., Hong, C., Xing, Y., Li, Y., Feng, L., Jia, M.: Combustion behaviors and kinetics of sewage sludge blended with pulverized coal: With and without catalysts. *Waste Manag.*, 74 (2018), pp. 288–296.
- [22] Chan,W.P., Wang, J.Y.: Comprehensive characterisation of sewage sludge for thermochemical conversion processes—Based on Singapore survey. *Waste Manag.*, 54 (2016), pp. 131–142.
- [23] Sivagurunathan, P., Kumar, G., Mudhoo, A., Rene, E. R., Saratale, G. D., Kobayashi, T., Xu, K., Kim, S.H., & Kim, D.H.: Fermentative hydrogen production using lignocellulose biomass: An overview of pre-treatment methods, inhibitor effects and detoxification experiences. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77 (2017), pp. 28-42.
- [24] Cyr, M., Coutand, M., Clastres, P.: Technological and environmental behavior of sewage sludge ash (SSA) in cement-based materials, *Cement and Concrete Research*, 37 (2007) 8, pp. 1278-1289.
- [25] Khanbilvardi, R., Afshari S.: Sludge ash as fine aggregate for concrete mix. *Journal of Environmental Engineering*, 121 (1995) 9, pp. 633-638.
- [26] Monzo, J., Paya, J., Borrachero, M.V., Corcoles, A.: Use of Sewage Sludge Ash (SSA)-Cement Admixtures in Mortars. *Cement and Concrete Research*, 26 (1996) 9, pp. 1389-1398.
- [27] Lin, D., Weng, C.: Use of sewage sludge ash as brick material, *Journal of Environmental Engineering*, 127 (2001) 10, pp. 922-927.
- [28] Brar, S., Verma, M., Tyagi, R., Surampalli, R.: Value Addition of Wastewater Sludge: Future Course in Sludge Reutilization. *Pract. Period. Hazard. Toxic Radioact. Waste Manage.*, 13 (2009) 1, pp. 59–74.
- [29] Lin, D., Luo, H., Sheen, Y.: Glazed tiles manufactured from incinerated sewage sludge ash and clay, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 55 (2005) 2, pp. 163-172.
- [30] Al Sayed, M., Madany, I., Bvali, A.: Use of Sewage Sludge Ash in Asphaltic Paving Mixes in Hot Regions, *Const. Build. Mater.*, 9 (1995) 1, pp. 19-23.
- [31] Cheeseman, C., Sollars, C., McEntee, S.: Properties, Microstructure and Leaching of Sintered Sewage Sludge Ash, *Resource Conservation and Recycling*, 40 (2003) 1, pp. 13-25.
- [32] Bhatty, J., Malisci, A., Iwasaki, I., Reid, K.: Sludge Ash Pellets as Concrete Aggregates in Concrete, *Cement, Concrete, and Aggregates*, 14 (1992) 1, pp. 55–61.

- [33] Chen, L., Deng-Fong, L.: Stabilization Treatment of Soft Subgrade Soil by Sewage Sludge Ash and Cement, Journal of Hazardous Materials, 162 (2009) 1, pp. 321-327.

HIDROPROJEKT-ING projektiranje d.o.o. Draškovićeva 35/I,

10000 Zagreb-HR

tel: +385 1 4553-146; +385 1 4553-141

fax: +385 1 4617-672

[info\\_zg35@hp-ing.hr](mailto:info_zg35@hp-ing.hr)



HIDROPROJEKT-ING

HIDROPROJEKT-ING, Odjel Miramarska

Miramarska 38, 10000 Zagreb-HR

tel: +385 1 6159-012; +385 1 6159-013

fax: +385 1 6150-125

info zg38@hp-ing.hr

HIDROPROJEKT-ING, Odjel Rijeka

Trg 128 brigade HV br. 10, 51000 Rijeka-HR

tel: +385 51 371-073

fax: +385 51 371-058

info\_ri@hp-ing.hr

[www.hp-ing.hr](http://www.hp-ing.hr)

**85**  
*years*  
1937-2022

# VEĆ 85 GODINA GRADIMO BUDUĆNOST ZAJEDNO

**85 godina timskog rada jeiza nas.** Zajedno sa svima vama, partnerima, izvođačima i investitorima nadilazimo izazove, dijelimo inovacije i strast, vodeći brigu o ljudima i okolišu. Još je mnogo toga ispred nas, **krenimo prema budućnosti zajedno.**

**20**

GODINA  
MAPEI.HR

 **MAPEI**<sup>®</sup>

# GRAĐEVINAR

Journal of the Croatian Association of Civil Engineers

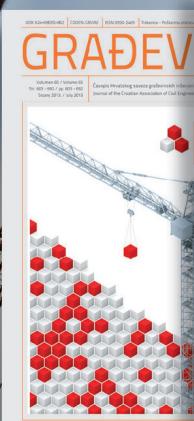
- Scientific and Professional Papers
- Professional news items

Abstracted/Index in:  
Science Citation Index Expanded

The journal is published regularly  
12 times a year since 1949.

Papers are published in Croatian  
language and, as of the first issue  
of GRAĐEVINAR for 2012, all papers  
in the online edition are entirely in  
Croatian and English

**The biggest scientific & professional  
journal of civil engineering in Croatia**



UOK 524-00051-062 | CODEN: GDEVIE | ISSN 0350-2665 | Tiskarica - Poltarne pisanje HP-ij d. d. u. poltarskom uredu (10000 Zagreb)

# GRAĐEVINAR

Volumen 65 / Volume 65  
Str. 869 - 970 / pp. 869 - 970  
Listopad 2013 / October 2013

Casopis Hrvatskog saveza građevinskih inženjera, Zagreb, Berislavićeva 6  
Journal of the Croatian Association of Civil Engineers, Zagreb, Berislavićeva 6

10/2013



Editorial Board address:  
Berislavićeva 6, Zagreb, Croatia

phone: +385 1 4872-502  
fax: +385 1 4872-526

e-mail: gradjevinar@hsgj.org  
[www.hsgj.org/gradjevinar](http://www.hsgj.org/gradjevinar)

# GRAĐEVINAR

Časopis Hrvatskog saveza građevinskih inženjera

- Znanstveno-stručni članci
- Stručno-informativni prilozi

Časopis redovito izlazi 12 puta godišnje od 1949. godine

Citiranost:  
Science Citation Index Expanded

Radovi se tiskaju na hrvatskom jeziku, a od broja 1/2012 svi radovi u on-line izdanju su u cijelosti na hrvatskom i engleskom jeziku

Najveći znanstveno-stručni časopis iz građevinarstva u Hrvatskoj



UDK 624.045(05)-002 | CODEN: GZDVE | ISSN 0950-2465 | Tiskarica - Poljoprinsavci

**GRAĐEV**

Volumen 60 / Volumen 60  
Str. 1-402 / str. 403-480  
Broj 1 / Broj 2  
Svibanj 2013 / August 2013

Croatian Association of Civil Engineers  
Journal of the Croatian Association of Civil Engineers

Volume 60 / Volumen 60  
Str. 393-1068 / str. 393-1068  
Rujan 2013 / September 2013

Croatian Association of Civil Engineers  
Journal of the Croatian Association of Civil Engineers

Hrvatski Graditeljski Forum 2013  
www.hgf.org.hr

Hrvatski Graditeljski Forum 2013  
19.-20. studenoga 2013.  
www.hgf.org.hr/hgf

## GRAĐEVINAR

Volumen 60 / Volumen 60  
Str. 669 - 970 / str. 669 - 970  
Listopad 2013. / October 2013

Croatian Association of Civil Engineers, Zagreb, Berislavićeva 6

Journal of the Croatian Association of Civil Engineers, Zagreb, Berislavićeva 6

10/2013





- ◆ Novosti u provedbi stručnog nadzora
- ◆ Konstrukcijska obnova zgrada nakon potresa
- ◆ Izrada projektno-tehničke dokumentacije za cjelovitu obnovu zgrada nakon potresa
- ◆ Procjena stanja i obnova postojećih građevina - ARES projekt
- ◆ Monitoring i analiza vibracija od prolaska tramvajskog vozila  
u svrhu zaštite zgrada oštećenih u potresu
- ◆ Izazovi koje nameću nove cijene građevnog materijala građevnog materijala
- ◆ Obrada građevnog otpada nastalog djelovanjem potresa
- ◆ Korištenje pojedinih vrsta otpada kao sirovine u građevinskoj industriji
- ◆ Važnost sinergije privrede i znanosti u povećanju održivosti zbrinjavanja otpada  
u okvirima kružnog gospodarstva