



2017.  
GODINA  
LX



# GRAĐEVINSKI MATERIJALI I KONSTRUKCIJE

# 4

# BUILDING MATERIALS AND STRUCTURES

---

ČASOPIS ZA ISTRAŽIVANJA U OBLASTI MATERIJALA I KONSTRUKCIJA  
JOURNAL FOR RESEARCH OF MATERIALS AND STRUCTURES

---



---

DRUŠTVO ZA ISPITIVANJE I ISTRAŽIVANJE MATERIJALA I KONSTRUKCIJA SRBIJE  
SOCIETY FOR MATERIALS AND STRUCTURES TESTING OF SERBIA

---



# GRAĐEVINSKI MATERIJALI I KONSTRUKCIJE

# BUILDING MATERIALS AND STRUCTURES

ČASOPIS ZA ISTRAŽIVANJA U OBLASTI MATERIJALA I KONSTRUKCIJA  
JOURNAL FOR RESEARCH IN THE FIELD OF MATERIALS AND STRUCTURES

---

## INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

Professor **Radomir Folić**, Editor in-Chief  
Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, Serbia  
Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija  
e-mail: [folic@uns.ac.rs](mailto:folic@uns.ac.rs)

Professor **Mirjana Malešev**, Deputy editor  
Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad,  
Serbia - Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom  
Sadu, Srbija, e-mail: [miram@uns.ac.rs](mailto:miram@uns.ac.rs)

Dr **Ksenija Janković**  
Institute for Testing Materials, Belgrade, Serbia  
Institut za ispitivanje materijala, Beograd, Srbija

Dr **Jose Adam, ICITECH**  
Department of Construction Engineering, Valencia,  
Spain.

Professor **Radu Banchila**  
Dep. of Civil Eng. „Politehnica“ University of  
Timisoara, Romania

Professor **Dubravka Bjegović**  
University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering,  
Department of Materials, Zagreb, Croatia

Assoc. professor **Meri Cvetkovska**  
Faculty of Civil Eng. University "St Kiril and Metodij",  
Skopje, Macedonia

Professor **Michael Forde**  
University of Edinburgh, Dep. of Environmental Eng.  
UK

Dr **Vladimir Gocevski**  
Hydro-Quebec, Montreal, Canada

Sekretar redakcije: **Slavica Živković**, mast.ekon.

Lektori za srpski jezik: Dr **Miloš Zubac**, profesor

**Aleksandra Borojev**, profesor

Proofreader: Prof. **Jelisaveta Šafranj**, Ph D

Technical editor: **Stoja Todorovic**, e-mail: [saska@imk.grf.bg.ac.rs](mailto:saska@imk.grf.bg.ac.rs)

Acad. Professor **Yachko Ivanov**  
Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

Dr. Habil. **Miklos M. Ivanyi**  
UVATERV, Budapest, Hungary

Professor **Asterios Liolios**  
Democritus University of Thrace, Faculty of Civil  
Eng., Greece

Professor **Doncho Partov**  
University of Construction and Architecture - VSU  
"LJ.Karavelov" Sofia, Bulgaria

**Predrag Popović**  
Wiss, Janney, Elstner Associates, Northbrook,  
Illinois, USA.

**Professor Tom Schanz**  
Ruhr University of Bochum, Germany

Professor **Valeriu Stoin**  
Dep. of Civil Eng. „Poloitehnica“ University of  
Timisoara, Romania

Acad. Professor **Miha Tomažević**, SNB and CEI,  
Slovenian Academy of Sciences and Arts,

Professor **Mihailo Trifunac**, Civil Eng.  
Department University of Southern California, Los  
Angeles, USA

## PUBLISHER

Society for Materials and Structures Testing of Serbia, 11000 Belgrade, Kneza Milosa 9  
Telephone: 381 11/3242-589; e-mail: [dimk@ptt.rs](mailto:dimk@ptt.rs), veb sajt: [www.dimk.rs](http://www.dimk.rs)

REVIEWERS: All papers were reviewed

KORICE: Prikaz grede prije ispitivanja s mjernim uređajima i nanošenje opterećenja

COVER: Beam prior to the test with measuring devices and loading application

Financial supports: Ministry of Scientific and Technological Development of the Republic of Serbia

# GRAĐEVINSKI MATERIJALI I KONSTRUKCIJE

# BUILDING MATERIALS AND STRUCTURES

ČASOPIS ZA ISTRAŽIVANJA U OBLASTI MATERIJALA I KONSTRUKCIJA  
JOURNAL FOR RESEARCH IN THE FIELD OF MATERIALS AND STRUCTURES

## SADRŽAJ

<b>Radomir FOLIĆ</b> IZVEŠTAJ O RADU NA UREĐIVANJU ČASOPISA GRAĐEVINSKI MATERIJALI I KONSTRUKCIJE ZA PERIOD OD OKTOBRA 2014. DO OKTOBRA 2017. GODINE .....	3
<b>Dragica JEVTIĆ</b> IZVEŠTAJ O RADU DRUŠTVA ZA ISPITIVANJE I ISTRAŽIVANJE MATERIJALA I KONSTRUKCIJA SRBIJE U PERIODU OD 2014. DO 2017. GODINE.....	5
<b>Dragan D. MILAŠINOVIĆ</b> TERMO-VISKO-PLASTIČNOST I TEČENJE U STRUKTURNO-MATERIJALNOM ODZIVU POLIEDARSKIH KONSTRUKCIJA <b>Originalni naučni rad</b> .....	7
<b>Naida ADEMOVIĆ</b> <b>Daniel V. OLIVEIRA</b> INDIKATORI OŠTEĆENJA OBIČNIH NEARMIRANIH ZIDANIH ZIDOVA IZLOŽENI SEIZMIČKIM DJELOVANJIMA <b>Originalni naučni rad</b> .....	17
<b>Igor JOKANOVIĆ</b> OCENA I POBOLJŠANJE ODRŽAVANJA GRADSKIH ULICA: STUDIJA SLUČAJA KRAGUJEVAC <b>Prethodno saopštenje</b> .....	33
<b>Merima ŠAHINAGIĆ-ISOVIĆ</b> <b>Marko ČEČEZ</b> ANALIZA ŠIRINE PUKOTINA GREDA OD MIKRO- ARMIRANOG BETONA SA ČELIČNIM VLAKNIMA <b>Originalni naučni rad</b> .....	53
<b>Uputstvo autorima</b> .....	67

## CONTENTS

<b>Radomir FOLIC</b> IZVEŠTAJ O RADU NA UREĐIVANJU ČASOPISA GRAĐEVINSKI MATERIJALI I KONSTRUKCIJE ZA PERIOD OD OKTOBRA 2014. DO OKTOBRA 2017. GODINE.....	3
<b>Dragica JEVTIC</b> IZVEŠTAJ O RADU DRUŠTVA ZA ISPITIVANJE I ISTRAŽIVANJE MATERIJALA I KONSTRUKCIJA SRBIJE U PERIODU OD 2014. DO 2017. GODINE.....	5
<b>Dragan D. MILASINOVIC</b> THERMO-VISCO-PLASTICITY AND CREEP IN STRUCTURAL-MATERIAL RESPONSE OF FOLDED- PLATE STRUCTURES <b>Original scientific paper</b> .....	7
<b>Naida ADEMOVIC</b> <b>Daniel V. OLIVEIRA</b> DAMAGE INDICATORS FOR UNREINFORCED MASONRY BUILDING WALLS SUBJECTED TO SEISMIC ACTIONS <b>Original scientific paper</b> .....	17
<b>Igor JOKANOVIC</b> ASSESSMENT AND IMPROVEMENT OF URBAN STREETS MAINTENANCE: CASE STUDY KRAGUJEVAC <b>Preliminary report</b> .....	33
<b>Merima SAHINAGIC-ISOVIC</b> <b>Marko CECEZ</b> CRACK WIDTH ANALYSIS OF STEEL FIBERS REINFORCED CONCRETE BEAMS <b>Original scientific paper</b> .....	53
<b>Preview report</b> .....	67

CIP - Каталогизacija u publikaciji  
Narodna biblioteka Srbije, Beograd

620.1

GRAĐEVINSKI materijali i konstrukcije :  
časopis za istraživanja u oblasti materijala  
i konstrukcija = Building Materials and  
Structures : journal for research of  
materials and structures / editor-in-chief  
Radomir Folić. - God. 54, br. 1 (2011)-  
- Beograd (Kneza Miloša 9) : Društvo za  
ispitivanje i istraživanje materijala i  
konstrukcija Srbije, 2011- (Novi Beograd :  
Hektor print). - 30 cm

Tromesečno. - Je nastavak: Materijali i  
konstrukcije = ISSN 0543-0798  
ISSN 2217-8139 = Građevinski materijali i  
konstrukcije  
COBISS.SR-ID 188695820



## IZVEŠTAJ O RADU

### NA UREĐIVANJU ČASOPISA GRAĐEVINSKI MATERIJALI I KONSTRUKCIJE ZA PERIOD OD OKTOBRA 2014. DO OKTOBRA 2017. GODINE

Oktoobra 2017. godine održani su XXVII kongres i Skupština DIMK-a, gde sam u svojstvu glavnog i odgovornog urednika časopisa „Građevinski materijali i konstrukcije“ podneo Izveštaj o radu od oktobra 2014. do oktobra 2017. godine. Taj izveštaj objavljuje se u ovom broju časopisa.

Prethodni izveštaj (period 2011–2014. godine) zajedno sa Izveštajem predsednika prof. dr Zorana Grdića o radu Društva u pomenutom periodu objavljen je u časopisu **broj 4 od 2014. godine**. U istom broju časopisa koji je štampan **na 62 strane** objavljena su četiri rada. Jedan rad odnosi se na zemljotresno inženjerstvo – zaštita mostova od seizmičkih dejstava, jedan na aspekte konstruktivnog inženjerstva – umeće projektovanja naseljenih mostova, jedan na savremene građevinske materijale i jedan na statističko modeliranje protoka vode. U dva rada autori su iz Hrvatske, jedan je iz Nemačke i jedan iz Srbije.

U ovom periodu su štampana po četiri broja časopisa godišnje, s brojem radova od tri do pet.

U **br. 1/ 2015.** godine publikovana su četiri rada **na 78 strana**. Jedan rad je iz Albanije, u jednom radu je jedan autor iz Švajcarske, a drugi iz Srbije, a u dva rada su autori iz Srbije. Jedan rad odnosi se na primenu neuronskih mreža kod procene čvrstoće betona pri pritisku, jedan na vrednovanje konstrukcijske pouzdanosti korišćenjem simulacije, a jedan tretira primenu slojevitih konačnih elemenata u analizi sendvič-konstrukcija s delaminacijama. Jedan rad razmatra metode određivanja potencijala revitalizacije graditeljskog nasleđa na primeru grada Berna – Švajcarska.

U broju **2/2015.** godine štampana su četiri rada **na 61 strani**. U jednom radu autori su iz Crne Gore, a u dva rada iz Srbije. Jedan rad odnosi se na stanovište održivosti prilikom izvođenja konstrukcije betonskih mostova, drugi rad analizira eksperimentalne rezultate pojačavanja zidova od blok-opeke karbonskim vlaknima, a treći rad tretira stabilnost kablovskih rešetki. Objavljen je In Memoriam prof. dr Ljubomir Vlajić.

U broju **3/2015.** godine, **sa 53 strane**, objavljena su tri rada. Dva rada su napisali autori iz Srbije, a jedan – autor iz Bugarske. Jedan rad tretira numeričko modeliranje reoloških fenomena betona (tečenje betona). U jednom radu se primenjuje nelinearna analiza oštećenih betonskih skeletnih zgrada i istražuje robusnost za različita scenarija, a u jednom radu višekriterijumsko vrednovanje izbora prozora u zgradama.

Broj **4/2015.** štampan je **na 70 strana**. U njemu su objavljena četiri rada. U jednom radu autori su iz Slovenije i BiH, a u tri – iz Srbije. Jedan rad odnosi se na primenu nove austrijske metode za građenje tunela. Jedan rad tretira svojstva samougrađujućeg betona s recikliranim agregatom, a jedan rad razmatra kriterijume stabilnosti deformacije elasto-plastičnog materijala.

U jednom radu analizira se ponašanje drvenih zgrada uz primenu unakrsno lameliranih elemenata. Pored toga, u ovom broju objavljen je In Memoriam prof. dr Milan Maksimović.

U časopisu broj **1/2016. godine sa 39 strana** štampano je tri rada. U jednom radu autori su iz Bugarske, u jednom iz Češke Republike, a jedan autor je iz Srbije. Prvi rad tretira lom betona ultravisokih čvrstoća. Drugi rad tretira primenu pojasnih lamela pri građenju čeličnih mostova. U trećem radu je prikazano istraživanje svojstava cementnih košuljica s dodatkom polipropilenskih vlakana i kompenzatora skupljanja. U ovom broju objavljen je In Memoriam prof. dr Đorđe Vuksanović.

Broj **2/2016.** štampan je **na 46 stranica** sa tri rada iz Srbije. Jedan rad tretira formulaciju konačnih elemenata u nelinearnoj analizi ramova. Drugi rad odnosi se na ekološki značaj, sastav i svojstva propusnog betona, a treći rad tretira hidrataciju i čvrstoću cementne paste s dodacima prirodnog zeolita.

Broj **3/2016.** godine sadrži **80 strana** sa četiri rada. U dva rada su autori iz Bugarske, a u ostala dva – iz Srbije. U prvom radu se razmatraju problemi i njihovo rešavanje Evro-kodova pri projektovanju betonskih konstrukcija. Drugi rad je na temu stabilnosti nelinearne analize stabilnosti konstrukcije okvira. U trećem se razmatra metoda dinamičke krutosti u analizi stabilnosti cilindričnih ljuski. Četvrti rad se odnosi na dekompoziciju spektralnih signala. U ovom broju objavljen je In Memoriam prof. dr Srđan Venečanin.

U broju **4/2016.** godine štampana su četiri rada **na 74 strane**. Prvi rad tretira eksperimentalnu i numeričku kalibraciju sile prednapreznja kod prednapregnutih zavrtnjeva. Drugi rad odnosi se na vibracije spregnutih tavanica čelik–beton pod vibracijama izazvanih ljudima. Zatim, smanjenje dozvoljenog seizmičkog dejstva kod nepokretnih kulturnih dobara visokogradnje. Na kraju, analiza i modeliranje spregnutih sistema drvo – beton pri proračunu mostova primenom evropskih normi.

Broj **1/2017.** godine sadrži **78 strana** s tri rada iz Srbije i jednim iz Makedonije. Prvi rad sadrži pregled seizmičkih analiza i načina uvođenja prigušenja u njima. Drugi rad odnosi se na fiber-konačne elemente u nelinearnoj analizi kvadratnih stubova. U trećem radu se razmatra praksa ojačanja drvenih greda FRP šipkama, a u četvrtom – kako smanjiti rizik određivanja kvaliteta građevinskih proizvoda.

U broju **2/2017.** godine štampano je pet radova **na 82 stranice**. Autori četiri rada su iz Srbije, a jednog iz Bugarske. U prvom radu prikazana je komparativna analiza uticaja tečenja betona spregnutih konstrukcija čelik–beton. U drugom radu razmatra se primena metode dinamičke krutosti pri analizi slobodnih vibracija ukrućenih ploča. Treći rad se odnosi na metode ispitivanja i tehničke uslove pričvršćivanja šina za betonske pragove.

U četvrtom radu razmatra se in situ određivanje koeficijenta trenja i imperfekcije kablova za prednaprezanje. Implementacija vlaknastog elementa greda–stub u softver Matrix 3D predmet je petog rada. U ovom broju objavljen je In Memoriam dr Petar Mitrović.

Broj 3/2017. godine štampan je na **84 strane** i sadrži pet radova. Četiri rada su napisali autori iz Srbije, a jedan autor iz Bosne i Hercegovine. Prvi rad odnosi se na numeričku analizu pritisnutih elemenata na fleksiono izvijanje. U drugom radu se razmatra problem seizmičke analize sekundarnih elemenata prema Evrokodu 8. Ocena stanja i sanacija mostova u Nišu predmet je trećeg rada. U četvrtom radu analiziraju se podzemne stambene zgrade i njihova energetska efikasnost, a analiza sakralnih objekata od drveta u BiH jeste predmet petog rada. U ovom broju objavljen je In Memoriam prof. dr Jordan Milev iz Sofije – Bugarska.

Svi objavljeni radovi imali su po dve pozitivne recenzije. Veći broj radova je klasifikovan kao originalni naučni rad ili stručni rad. Manji broj radova je iz kategorije prethodno saopštenje i pregledni rad.

Iz napred datog pregleda radova vidi se da je učešće autora iz susednih zemalja zadovoljavajuće i da doprinosi obogaćivanju časopisa.

I u ovom periodu mali je broj autora koji citiraju radove iz našeg časopisa, što otežava njegovo napredovanje u citatnim bazama. Još jednom naglašavam da je naročito važno citirati radove iz poslednje dve godine, jer one ulaze u obradu Impakt Faktora.

Od 2013. godine časopis se, odlukom Matičnog odbora Ministarstva za obrazovanje, nauku i tehnološki

razvoj, vrednuje kategorijom M24=3 poena. Časopis je od 2015. godine prijavljen za praćenje kod Thomson Reuters-a i izrazito je važno održati redovnost objavljivanja. Od novembra 2014. godine, Centar za evaluaciju u obrazovanju i nauci omogućio je korišćenje servisa za elektronsko uređivanje našeg časopisa i svaki rad dobija odgovarajući DOI broj. To doprinosi unapređivanju efikasnosti rada uredništva i zaštitu od objavljivanja duplikata ili plagiranih radova, poboljšanje kvaliteta i uticajnosti časopisa, a time i baze SCI indeksa – Srpski citatni indeks u celini. Pored toga, omogućen je napredak u poštovanju međunarodnih etičkih i publicističkih normi.

Početak ove godine inovirali smo Uputstvo – smernice (Guidelines) za autore, uvodeći polja građevinarstvo i slične discipline (geodezija i arhitektura). To je urađeno po ugledu na časopis Građevinar – Zagreb, koji je kategorije M23.

U 2016. godini naš časopis je uvršten u Emerging Sources Citation Index list i vodi se pod slovom G kao Građevinski (sa d umesto đ) ali je naslov na engleskom adekvatan – Building Materials and Structures. Sajt na kome je lista **Emergin sources citation index** je: [http://ip-science.thomsonreuters.com/mjl/?utm\\_source=false&utm\\_medium=false&utm\\_campaign=false](http://ip-science.thomsonreuters.com/mjl/?utm_source=false&utm_medium=false&utm_campaign=false)

Pri uređivanju, imao sam pomoć i veoma uspešnu saradnju s lektorima prof. dr Jelisavetom Šafran, dr Milošem Zupcem, tehničkim urednikom časopisa Stojom-Saškom Todorović i sekretarom Društva i Redakcionog odbora Slavicom Živković, na čemu im srdačno zahvaljujem.

U Novom Sadu, oktobra 2017. godine

Glavni i odgovorni urednik

Prof. dr Radomir Folić

## IZVEŠTAJ O RADU

### DRUŠTVA ZA ISPITIVANJE I ISTRAŽIVANJE MATERIJALA I KONSTRUKCIJA SRBIJE U PERIODU OD 2014. DO 2017. GODINE

Društvo za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija Srbije (DIMK Srbije) u periodu između XXVI i XXVII Kongresa, tj. od novembra 2014. do novembra 2017. godine, realizovalo je niz aktivnosti čiji je cilj bio dalje unapređivanje rada Društva, afirmisanje istraživanja u oblasti materijala i konstrukcija, kao i građevinske struke u celini.

#### RAD DIMK SRBIJE U 2014. GODINI

Glavna aktivnost Društva u 2014. godini bila je organizovanje XXVI Kongresa i Međunarodnog simpozijuma Istraživanja i primena savremenih dostignuća u građevinarstvu u oblasti materijala i konstrukcija. Pozivu za učešće na Simpozijumu odazvao se veliki broj autora i koautora iz celog regiona, tako da je tim povodom štampan i Zbornik sa ukupno 54 rada na 613 strana.

Radovi štampani u Zborniku podeljeni su u 8 tematskih celina:

- Istraživanja na području materijala i njihove primene (20 radova);
- Teorijska i eksperimentalna analiza konstrukcija (14 radova);
- Projektovanje i građenje objekata (3 rada);
- Aseizmičko projektovanje i građenje (2 rada);
- Održavanje i sanacija građevinskih objekata (5 radova);
- Materijali, konstrukcije i životna sredina (6 radova);
- Energetska efikasnost građevinskih objekata (4 rada);
- Građevinsko-tehnička regulativa i sistem kvaliteta (3 rada).

Editor Zbornika radova bio je prof. dr Zoran Grdić.

Skup je održan u hotelu „Solaris Resort” u Vrnjačkoj Banji, od 29.10.2014. do 31.10.2014. godine pod pokroviteljstvom Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije. Organizator skupa je bio Institut za ispitivanje materijala a.d. Institut „IMS”, Beograd. Suorganizatori su bili Društvo za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija Srbije, Udruženje savremene industrije glinenih proizvoda Srbije i inženjerska komora.

Skup je otvorio prof. dr Zoran Grdić, predsednik DIMK Srbije, a pozdravili su ga prof. dr Vlastimir Radonjanin, Inženjerska komora Srbije, te prof. dr Radomir Folić, predsednik Saveza građevinskih inženjera Srbije.

Kako je Društvo tokom 2014. godine raspisalo Konkurs za dodelu priznanja najboljem doktoratu urađenom iz oblasti delatnosti Društva u periodu od 2011. do 2014. godine, dodeljena su dva ravnopravna priznanja kolegama, dr Ivanu Ignjatoviću sa Građevinskog fakulteta u Beogradu i doc. dr Predragu Blagojeviću sa GAF Niš, a prikaz doktorata bio je sastavni deo Zbornika radova.

Treba istaći da je velik broj radova bio vezan za naučno-istraživačke projekte, kao na primer projekte TR36017, TR 36042, TR 36028, TR 35043, TR 16004 Projekat III 42012.

Zaključci skupa bili su sledeći:

Simpozijum DIMK Srbije imao je međunarodni karakter što je izuzetno važno za nauku na polju ispitivanja i istraživanja materijala i konstrukcija. Prisustvo učesnika na simpozijumu bilo je zadovoljavajuće.

Posebno je bilo značajno prisustvo učesnika istraživača i inženjera iz okruženja: Slovenije, Makedonije, Bosne i Hercegovine. Prvi put se u odnosu na prethodni trogodišnji period uočava značajan napredak u praćenju svetske naučne literature iz odgovarajućih naučnih grana, što je pretočeno u domaća eksperimentalna istraživanja. Zaključeno je da učešće na međunarodnim i nacionalnim projektima, a i novi uslovi za izbore u viša zvanja na univerzitetima u zemlji i okruženju, daju značajan napredak u procesu istraživanja. Prisutan je velik broj mladih istraživača - studenata doktorskih studija čiji su rezultati rada vidni na osnovu izloženih radova na skupu. Posebno važan zaključak koji se može izvesti jeste da Republika Srbija na polju naučnih oblasti koje su na ovom simpozijumu obrađene ne kasni u naučnim dostignućima, već ide u korak sa zemljama u svom okruženju, što je i najveći značaj ovog kongresa.

#### RAD DIMK SRBIJE U 2015 . GODINI

DIMK Srbije u saradnji sa Institutom IMS, pod pokroviteljstvom Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Srbije, a uz podršku Inženjerske komore Srbije, organizovalo je konferenciju pod nazivom Građevinski materijali u savremenom graditeljstvu, kao doprinos unapređivanju znanja iz sledećih oblasti: keramičkih materijala, kompozita, izolacionih, konstrukcionih i eko-materijala, kao i tehničke regulative. Konferencija je održana u Beogradu, 19. juna 2015. godine, na Građevinskom fakultetu. Pozvani su afirmisani stručnjaci i naučni radnici iz naše zemlje i okruženja da domaćoj stručnoj i naučnoj javnosti približe aktuelna saznanja i rešenja iz domena problematike na koju se konferencija odnosila. Tom prilikom, publikovan je Zbornik radova na 182 strane, sa 18 radova. Svaki rad imao je UDK broj dobijen u Narodnoj biblioteci Srbije, prema važećoj klasifikaciji. Editor Zbornika bila je prof. dr Dragica Jevtić.

Konferencija je imala značajan vid edukacije, pa je uvršćena u Program permanentnog usavršavanja članova Inženjerske komore Srbije i bodovala se sa 5 bodova za prijavljene učesnike, saglasno Pravilniku o kontinuiranom profesionalnom usavršavanju članova Inženjerske komore Srbije.

#### RAD DIMK SRBIJE U 2016. GODINI

DIMK Srbije, u saradnji sa Institutom IMS, pod pokroviteljstvom Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Srbije, a uz podršku Inženjerske komore Srbije, organizovalo je konferenciju pod nazivom Savremeni materijali i konstrukcije sa regulativom, kao doprinos unapređivanju znanja iz sledećih oblasti: keramičkih materijala, kompozita, izolacionih, konstrukcionih i eko-materijala, kao i aktuelne domaće i međunarodne regulative. Konferencija je održana u Beogradu, 17. juna 2016. godine, na Građevinskom fakultetu. Pozvani su afirmisani stručnjaci i naučni radnici iz naše zemlje i okruženja da domaćoj stručnoj i naučnoj javnosti približe aktuelna saznanja i rešenja iz domena problematike na koju se konferencija odnosila. Tom prilikom, publikovan je Zbornik radova na 130 strana, sa 14 radova. Svaki rad

imao je UDK broj dobijen u Narodnoj biblioteci Srbije prema važećoj klasifikaciji. Editor Zbornika bila je prof. dr Dragica Jevtić.

Konferencija je imala značajan vid edukacije, pa je uvršćena u Program permanentnog usavršavanja članova Inženjerske komore Srbije i bodovala se sa 5 bodova za prijavljene učesnike, saglasno Pravilniku o kontinuiranom profesionalnom usavršavanju članova Inženjerske komore Srbije.

## RAD DIMK SRBIJE U 2017. GODINI

Glavna aktivnost Društva u 2017. godini bila je organizovanje XXVII Kongresa i Međunarodnog simpozijuma Istraživanja i primena savremenih dostignuća u građevinarstvu u oblasti materijala i konstrukcija. Pozivu za učešće na Simpozijumu odazvao se velik broj autora i koautora iz celog regiona, tako da je tim povodom štampan Zbornik sa ukupno 59 radova na 577 strana.

Radovi štampani u Zborniku su podeljeni u 9 tematskih celina:

- Istraživanja na području materijala i njihove primene (13 radova);
- Teorijska i eksperimentalna analiza konstrukcija (10 radova);
- Projektovanje i građenje objekata (1 rad);
- Aseizmičko projektovanje i građenje (5 radova);
- Održavanje i sanacija građevinskih objekata (11 radova);
- Materijali, konstrukcije i životna sredina (9 radova);
- Energetska efikasnost građevinskih objekata (5 radova);
- Građevinsko-tehnička regulativa i sistem kvaliteta (3 rada);
- Upravljanje projektima u građevinarstvu (2 rada).

Publikovani su radovi autora iz Srbije, Slovenije, Hrvatske, Makedonije, Bosne i Hercegovine, Crne Gore i Kanade, a koji su obuhvatili sve navedene teme. Kao što će čitalac primetiti, autori radova nisu samo građevinski inženjeri, već i arhitekte, hemičari, tehnolozi, mineralozi, pa čak i vajari.

Sve ovo govori o multidisciplinarnosti oblasti kojima se istraživači bave u okviru svojih naučno-istraživačkih projekata.

Najveći broj radova obuhvata prvu, drugu i petu osnovnu temu. Poseban kvalitet postignut je zajedničkim radom istraživača iz više zemalja (Srbija-Slovenija, Srbija - Hrvatska, Srbija - Crna Gora, Srbija - Bosna i Hercegovina).

S obzirom na savremenu i aktuelnu problematiku održivog razvoja, tj. održivog graditeljstva i na količine otpadnih materijala i sam problem njihovog postojanja, u mnogim radovima prikazuju se rezultati eksperimentalnih istraživanja dobijeni primenom otpadnih materijala, kao na primer letećeg pepela, crvenog mulja, zgure, silikatne prašine, recikliranog otpadnog katodnog stakla, jalovine iz rudnika olova i cinka, recikliranog agregata i poljoprivrednog otpada.

Mikrostrukturi i trajnosti kompozita na bazi ovih materijala posvećena je dužna pažnja, a rezultati su dobijeni savremenim metodama ispitivanja.

U Zborniku su prikazani radovi koji dotiču problematiku energetske efikasnosti građevinskih objekata,

probleme vezane za ventilaciju, grejanje i hlađenje, kao i rezultate konkretnih merenja relevantnih svojstava na objektima.

Nekoliko radova tretira oblast građevinsko-tehničke regulative i sistema kvaliteta, pa tako obuhvata reakcije građevinskih proizvoda na požar, zahteve kvaliteta, standarde i metode ispitivanja. Takođe, u radovima je obuhvaćena Evropska uredba o građevinskim proizvodima, CE znak i primena u praksi. U okviru materijala, konstrukcija i životne sredine, radovi, između ostalog, obrađuju održivo rešenje za očuvanje prirodnih resursa i odgovorno upravljanje otpadom.

Oblast Održavanje i sanacija građevinskih objekata prikazana je u većem broju radova putem konkretnih, veoma vrednih i interesantnih primera.

Koliko je važna saradnja istraživača različitih struka u tehnologiji proizvodnje savremenih visokovrednih materijala, pokazuje rad koji obrađuje dobijanje karbonskih traka iz lignina, kao veoma dostupnog i jeftinog materijala.

Estetika građevinskih materijala prikazana je u nekoliko radova.

Tema Upravljanje projektima u građevinarstvu obuhvata stvaranje uslova za izradu mozaika u spomenhramu Svetog Save u Beogradu.

Editori Zbornika radova jesu prof. dr Dragica Jevtić i emeritus prof. dr Radomir Folić.

Skup je održan u hotelu "Srbija", Vršac, od 18.10.2017. do 20.10.2017. godine pod pokroviteljstvom Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije. Organizator skupa je bio Institut za ispitivanje materijala a.d. Institut „IMS“, Beograd.

Kako je Društvo tokom 2017. godine raspisalo Konkurs za dodelu priznanja najboljem doktoratu urađenom iz oblasti delatnosti Društva u periodu od maja 2014. do maja 2017. godine, dodeljena su dva ravnopravna priznanja kolegama: doc. dr Nenadu Ristiću sa GAF Niš i doc. dr Ivanu Lukiću, sa FTN, Novi Sad. Prikaz doktorata sastavni je deo Zbornika radova.

Kongres ne bi mogao uspešno da se realizuje bez učešća sponzora kojima i ovom prilikom najtoplije zahvaljujem. To su SIKA, TONDACH, MAPEI, CRH, ADING, IMS.

Društvo je u prethodnim godinama radilo na jačanju kvaliteta časopisa "Građevinski materijali i konstrukcije", a u tom smislu, dragocena nam je pomoć sponzora kako bi se obezbedilo njegovo kontinuirano publikovanje. To su sledeće firme: KOTO, IZOMONT, TKK, MAPEI, CRH, MATEST, LAFARGEHOLCIM, SIKA, DOKA, TITAN, čiji propagandni materijal je štampan u okviru časopisa.

Posebnu zahvalnost izražavam emeritusu prof. dr Radomiru Foliću, koji je sve svoje snage posvetio napredovanju časopisa "Građevinski materijali i konstrukcije". Časopis ima realne izgleda da uskoro bude na SCI listi, što je i bio jedan od glavnih ciljeva našeg Društva. U tom smislu, njegov doprinos je nemerljiv.

Zahvaljujem članovima Upravnog odbora DIMK Srbije, posebno potpredsedniku Društva dr Zagorki Radojević, kao i sekretaru Društva Slavici Živković na timskom radu i posvećenosti ciljevima Društva.

Izveštaj o finansijskom poslovanju Društva posebno je dat.

Beograd, oktobar 2017.

Predsednik DIMK Srbije

Prof. dr Dragica Jevtić, dipl.inž.tehn.sr



# TERMO-VISKO-PLASTIČNOST I TEČENJE U STRUKTURNO-MATERIJALNOM ODZIVU POLIEDARSKIH KONSTRUKCIJA

## THERMO-VISCO-PLASTICITY AND CREEP IN STRUCTURAL-MATERIAL RESPONSE OF FOLDED-PLATE STRUCTURES

*Dragan D. MILAŠINOVIĆ*

ORIGINALNI NAUČNI RAD  
ORIGINAL SCIENTIFIC PAPER  
UDK: 624.074:539.374  
doi:10.5937/GRMK1704007M

### 1 UVOD

Pri projektovanju konstruktivnog elementa podvrgnutog mehaničkim i termalnim opterećenjima potrebno je adekvatno uzeti u obzir ponašanje materijala pod takvim uslovima. Mnogi nacionalni i međunarodni standardi uspostavljeni su za projektovanje/proračun na povišenim temperaturama, kao rezultat iskustva i istraživanja tokom više decenija. Metodi analize koji uključuju termo-visko-plastičnu deformaciju i deformaciju tečenja bili su najpre analitičkog tipa [1]. Kasnije, s napretkom MKE, numerički postupci razvijeni su kako bi se mogli koristiti da realno predvide odzive u veoma složenim konstrukcijama [2]. Ove numeričke procedure uključene su u računarske programe opšte namene, po konačnim elementima, kao što su ADINA, ABAQUS, MARC, PAK, i tako dalje. Numerički algoritam predstavljen u ovom radu oslanja se uglavnom na primenu RDA, koja je razvijena od strane autora za analizu unutrašnje prigušenih neelastičnih konstrukcija [3]. RDA je vrsta neelastične analize, koja transformiše jednu kategoriju veoma komplikovanih materijalno-nelinearnih problema u jednostavnije linear-no-dinamičke probleme korištenjem modalne analize [4, 5]. Ovaj koncept ponešto je generalizovan u ovom radu, posebno za termička opterećenja.

Razvoj metoda za nelinearnu analizu, naročito u okviru MKE, doveo je do mogućnosti rešavanja veoma komplikovanih inženjerskih problema. Na primer, vlaknasti konačni elementi, greda/stub, na bazi distribuirane plastičnosti pokazali su se veoma uspešnim za modeliranje čelika, betona i kompozitnih materijala [6]. U poslednje dve decenije, razvoj metoda za analizu konstrukcija izloženih uticaju zemljotresa u brzini je ekspanziji.

---

Prof. dr Dragan D. Milašinović, Univerzitet u Novom Sadu,  
Građevinski fakultet Subotica, Srbija, [ddmil@gf.uns.ac.rs](mailto:ddmil@gf.uns.ac.rs)

### 1 INTRODUCTION

In designing structural element subjected to mechanical and thermal loadings it is necessary to adequately take into account material behaviour under such conditions. Many national and international standards have been established for design at elevated temperatures, as a result of experience and research over many decades. Methods of analysis which include thermo-elastic-plastic and creep deformation were first of analytical type [1]. Later, with the progress of FEM, numerical procedures have been developed which can be used to realistic predict response of very complex structures [2]. These numerical procedures have been implemented in general purpose finite element programs, like ADINA, ABAQUS, MARC, PAK, etc. The numerical algorithm presented in this paper relies on the main idea of the RDA employed by the author for the analysis of visco-elasto-plastic (VEP) vibrations and their use for the analysis of internally damped inelastic structures [3]. The RDA is a type of inelastic analysis, which transforms one category of very complicated material non-linear problems to simpler linear dynamical problems using modal analysis [4, 5]. This concept is generalized in this paper, particularly for the thermal loading.

Development of methods for non-linear analysis, especially within the FEM, has lead to possibility of solving very complex engineering problems. For instance, distributed plasticity fibre based beam/column elements are proven to be very successful for modelling steel, concrete and composite structures [6]. In the last two decades, development of methods for analysis of

---

Prof. dr Dragan D. Milašinović, University of Novi Sad,  
Faculty of Civil Engineering Subotica, Serbia,  
[ddmil@gf.uns.ac.rs](mailto:ddmil@gf.uns.ac.rs)

Niz mogućnosti za rešavanje složenih problema je formirano – kako za svakodnevnu inženjersku praksu, tako i u svrhu naučnih istraživanja [7]. Cilj ovog rada jeste da obezbedi jedinstven okvir za kvazistatička neelastična izvijanja i termička opterećenja ravnomerno pritisnutih poliedarskih konstrukcija, koristeći MKT [3]. Prvi rad o MKT objavio je Cheung, kasnih šezdesetih godina prošlog veka. Od tada, mnogi doprinosi učinjeni su u području strukturne analize s visokom efikasnošću. Milašinović [8, 9] razvio je harmonijski spojeni MKT, uključujući Green-Lagrange članove deformacija u formulaciju, tako da su savijajuće i membranske geometrijske krutosti spojene, dajući preciznija predviđanja, naročito prilikom velikih ugiba i elastične analize postkritičnog ponašanja. MKT jeste varijanta MKE. Za primenu na poliedarske konstrukcije, umesto diskretizacije konačnim elementima, tankozidni poprečni presek diskretizuje se u niz podužnih traka (ili elemenata). Funkcije oblika u poprečnom i podužnom pravcu odabrane su da predstavljaju polje pomeranja. Zatim, slično kao i u MKE, problem svojstvenih vrednosti za analizu izvijanja može se formulisati korištenjem različite teorije ploča, ali s manje stepeni slobode.

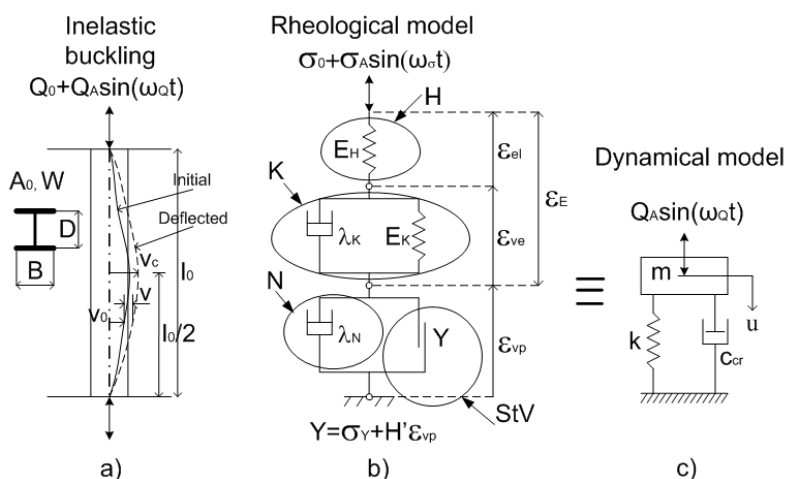
## 2 REOLOŠKO-DINAMIČKA ANALOGIJA I TERMALNI EFEKTI

Materijalne mikropukotine prate opterećivanje uzorka. Razmatramo slučaj VEP deformacija u početno geometrijski nepravilnom stubu prikazanom na sl. 1(a). U istraživanjima materijala, obe funkcije, napon  $s(t)$  i neelastična deformacija  $e(t) = e_{ve}(t) + e_{vp}(t)$  jesu funkcije vremena. Ako je totalna VEP deformacija  $e(t) = e_e + e(t)$  predstavljena kao suma od elastične (trenutne), viskoelastične (VE) i viskoplastične (VP) komponente, onda svaki jednovremeni napon–deformacija dijagram za dugi simetričan stub s poprečnim presekom  $A_0$  može biti precizno aproksimiran reološkim modelom H-K-(StV|N), koji se sastoji od pet elemenata. Za odgovarajući reološki model - prikazan na sl. 1(b) - korišteni su sledeći

structures exposed to earthquake actions saw a rapid expansion. An array of alternatives for solving common and complex problems was formed, both in everyday engineering practice, and in scientific research [7]. This paper aims at providing a unified frame for quasi-static inelastic buckling and thermal loading of uniformly compressed plate structures using the FSM [3]. The first paper on the FSM was published by Cheung in the late 1960s. Since then, many developments have been made toward structural analysis with high efficiency. Milašinović [8, 9] developed a harmonic coupled FSM by including the Green-Lagrange strain terms in the formulations, thus bending and membrane are coupled in the geometric stiffness to give more accurate buckling behaviour prediction, especially in large-deflection and elastic postbuckling analysis. The FSM is a variant of the FEM. For its application to folded-plate structures, instead of a finite element discretization, a thin-walled cross-section is discretized into a series of longitudinal strips (or elements). Shape functions in the transverse and longitudinal directions are selected to represent the displacement field. Then, similar to FEM, an eigenvalue problem for buckling analysis can be formulated using different plate theories, but with less degree of freedoms (DOFs).

## 2 RHEOLOGICAL-DYNAMICAL ANALOGY AND THERMAL EFFECTS

Material micro cracking is accompanied by the loading of a specimen, leading to its damage and failure. Consider the case of the VEP strains of a initial imperfect column presented in Fig. 1(a). In material investigations, both stress  $s(t)$  and inelastic strain  $e(t) = e_{ve}(t) + e_{vp}(t)$  are functions of time. If the total VEP strain  $e(t) = e_e + e(t)$  is presented as a sum of elastic (instantaneous), viscoelastic (VE) and viscoplastic (VP) components, each isochronous stress-strain diagram of a long symmetrical column with a cross section  $A_0$  can accurately be approximated by a rheological model H-K-(StV|N), consisting of five elements. The corresponding rheological model is shown in Fig. 1(b) using the following



Slika 1. RDA: a) Početno geometrijski nepravilan stub ; b) reološki model; c) dinamički model  
Figure 1. RDA: a) Initial imperfect column; b) rheological model; c) dynamical model

simboli: N - za Newton-ov materijal, StV - za Saint Venant-ov materijal, H - za Hooke-ov materijal, "|" - za paralelnu vezu (jedan kraj drugog) i "-" - za serijsku vezu (jedan za drugim)

Kako su Hooke-ov materijal, Kelvinov viskoelastičan materijal (K=H|N) i VP materijal (StV|N) spojeni u seriji, naponi  $\sigma(t)$  u ovim modelima materijala su jednaki. Na osnovu reološkog modela, Milašinović [3] izveo je njegovu diferencijalnu jednačinu:

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}(t) + \sigma(t) \left( \frac{E_K}{I_K} + \frac{H'}{I_N} \right) + e(t) \frac{E_K H'}{I_K I_N} = \frac{\dot{\sigma}(t)}{E_H} + \sigma(t) \left( \frac{E_K}{I_K E_H} + \frac{H'}{I_N E_H} + \frac{1}{I_K} + \frac{1}{I_N} \right) + \\ + s(t) \left( \frac{E_K}{I_K I_N} + \frac{H'}{I_K I_N} + \frac{E_K H'}{I_K I_N E_H} \right) - s_Y \frac{E_K}{I_K I_N} \end{aligned} \quad (1)$$

gde je  $E_H$  modul elastičnosti,  $\sigma_Y$  jednoosijalni napon tečenja, a  $Y = \sigma_Y + H' \varepsilon_{vp}(t)$  jeste VEP kriterijum tečenja.

Četiri fizičke osobine u fiksnom intervalu jesu: uzdužna VE viskoznost  $I_K$ , uzdužna VP viskoznost  $I_N$ , VE modul  $E_K$  i VP modul  $H'$ . Međutim, ove konstante ne mogu lako da se odrede u fizičkim eksperimentima, posebno Trutonove viskoznosti  $I_K$  i  $I_N$ .

Među različitim vrstama vremenski zavisnih napona, sinusoidalni naponi su među najvažnijim i stoga su najčešće ispitivani u vezi s različitim problemima (npr. zamor i dinamička nestabilnost). Takvi naponski uslovi poznati su u reologiji kao dinamičko opterećenje. Razmotrimo sinusoidalni zakon.

$$s(t) = s_0 + s_A \sin(w_s t) \quad (2)$$

s konstantnim naponom  $s_0$  i varijabilnom komponentom ciklusa  $s_A$ .  $w_Q = w_s$  jeste frekvencija opterećenja ili napona.

Sada ćemo definisati dinamički modul (RDA modul) tako da RDA model prigušimo kritično [4]

$$E_R = E_H \frac{1+j+d^2}{(1+j)^2+d^2}, \quad \lim_{d \rightarrow 0} E_R = E_H \frac{1}{1+j} \quad (3)$$

gde je  $d = w_s/w$  relativna frekvencija, a  $w$  prirodna frekvencija.

Ukupni koeficijent tečenja  $j$  u području VEP deformacija, koji uključuje termalni koeficijent tečenja  $j_T$ , može biti definisan kako sledi:

$$j = j^* + \frac{E_H}{H'^D} + j_T \quad (4)$$

gde je  $j^*$  strukturni koeficijent tečenja određen na bazi preseka Euler-ove i RDA krive izvijanja na granici elastičnosti.  $H'^D$  je dinamički VP modul [5].

symbols: N for the Newtonian dashpot, StV for Saint-Venant's body, H for the Hookean spring, "|" for a parallel connection and "-" for a connection in a series.

Since the Hookean spring, Kelvin's body (K=H|N) and VP body (StV|N) are connected in a series, stresses  $\sigma(t)$  in all the models are equal. Based on a rheological model, Milašinović [3] derived a governing differential equation

where  $E_H$  is the elastic modulus,  $\sigma_Y$  the uniaxial yield stress and  $Y = \sigma_Y + H' \varepsilon_{vp}(t)$  the VEP yield criterion.

The four properties at fixed step times are: extensional VE viscosity  $I_K$ , extensional VP viscosity  $I_N$ , VE modulus  $E_K$  and VP modulus  $H'$ . However, these constants cannot easily be determined in physical experiments, especially Trouton's viscosities  $\lambda_K$  and  $\lambda_N$ .

Among the various types of time-dependent stresses, sinusoidal stresses are among the most important, and are consequently most widely investigated in relation to various problems, such as fatigue, dynamic instability, etc. Such stressing conditions are known in rheology as dynamic loading. Let us consider the sinusoidal law

with  $s_0$  being a constant and  $s_A$  a variable component of the cycle.  $w_Q = w_s$  is a load or stress frequency.

Let us now define the dynamic modulus (RDA modulus) along the way required to damp the RDA model critically [4]

where  $d = w_s/w$  is the relative frequency and  $w$  is the natural frequency.

The total creep coefficient  $j$  in the range of VEP strains, which includes the thermal creep coefficient  $j_T$  may be defined as follows

where  $j^*$  is the structural creep coefficient determined based on the Euler and RDA buckling curves intersection at the elastic limit and  $H'^D$  is the dynamic VP modulus [5].

### 3 ANALIZA IZVIJANJA KORIŠTENJEM METODA KONAČNIH TRAKA

#### 3.1 Elastično izvijanje

Iako se za formulaciju matrica krutosti mogu koristiti različite teorije (npr. Kirchhoff-Love teorija nasuprot Mindlin-Reissner teorije), problem svojstvenih vrednosti povezan sa elastičnim izvijanjem geometrijski idealne konstrukcije, razmatrajući samo geometrijsku nelinearnost, može biti definisan na isti način.

Dobro je poznato to da se ukupna potencijalna energija trake definiše kao zbir energije deformacije, potencijalne energije usled sila u čvornim linijama, kao i dodatne potencijalne energije usled početnih napona. Formulacija jednačina ravnoteže, primenom principa minimuma ukupne potencijalne energije, daje

$$\hat{\mathbf{K}}\mathbf{q} + \mathbf{K}_s\mathbf{q} = \mathbf{Q} \quad (5)$$

Kada je u pitanju linearna stabilnost, sile  $\mathbf{Q}$  u čvornim linijama su nula i stoga je moguće izvođenje jednačina svojstvenih vrednosti [3]

$$\left[ \hat{\mathbf{K}} - \lambda \mathbf{K}_s \right] \mathbf{q} = \mathbf{0} \quad (6)$$

gde je  $\hat{\mathbf{K}}$  konvencionalna elastična matrica krutosti,  $\mathbf{K}_s$  je geometrijska matrica krutosti,  $\lambda$  je svojstvena vrednost (faktor opterećenja pozitivan pri pritisku), a  $\mathbf{q}$  predstavlja svojstveni vektor (mod izvijanja). Dakle, kritični napon izvijanja jeste

$$s_{cr} = \frac{I_{\min}}{2 \cdot t} \quad (7)$$

Na osnovu jed. (7), za jednu konačnu traku možemo formirati jednačine svojstvenih vrednosti za sistem konačnih traka. Problem svojstvenih vrednosti sastoji se u tome da se izračunaju parovi rešenja  $I_{im}$  i  $\mathbf{q}_{im}$  za sve stepene slobode i sve članove reda. Naponi izvijanja jesu

$$s_{im} = \frac{I_{im}}{2 \cdot t}, \quad (8)$$

gde je  $i$  broj stepena slobode, a  $m$  broj člana reda.

U poluanalitičkom MKT, koji kombinuje elemente klasične metode Ritz-a i MKE, opšti oblik funkcije pomeranja može se napisati kao proizvod polinoma i trigonometrijskih funkcija

$$f = \mathbf{F}\mathbf{q} = \sum_{m=1}^r Y_m(y) \sum_{k=1}^c \mathbf{N}_k(x) \mathbf{q}_{km} \quad (9)$$

gde su  $Y_m(y)$  funkcije iz Ritz-ovog metoda, a  $\mathbf{N}_k(x)$  jesu interpolacione funkcije iz MKE [3]. U analizi elastičnog izvijanja, tri uticajna aspekta jesu granični uslovi, izbor trake i mreža.

Najčešće korišteni redovi su osnovne funkcije (ili funkcije svojstvenih vrednosti), izvedene iz rešenja diferencijalne jednačine vibracija grede

### 3 BUCKLING ANALYSIS USING FINITE STRIP METHOD

#### 3.1 Elastic buckling

Although the formulation of the stiffness matrices may use different plate theories (e.g. Kirchhoff-Love theory versus Mindlin-Reissner theory), a similar eigenvalue problem associated with elastic buckling on a perfect structure considering only geometric nonlinearity may be defined in the same way.

It is well-known that the total potential energy of a strip is defined as the sum of the strain energy, potential energy due to nodal line forces, as well as the additional potential energy due to the initial stress. The formulation of equilibrium equation using the principle of minimum total potential energy yield

As far as linear stability is concerned, the nodal forces  $\mathbf{Q}$  are zero and it is therefore possible to derive the eigenvalue equation [3]

where  $\hat{\mathbf{K}}$  is the conventional elastic stiffness matrix,  $\mathbf{K}_s$  is the geometric stiffness matrix,  $\lambda$  is the eigenvalue (load factor is compression positive), and  $\mathbf{q}$  is the eigenmode (buckling mode) vector. Hence, the critical buckling stress is

Based on Eq. (7) for one finite strip we can form the eigenvalue equations for a system of finite strips. The eigenproblem is to extract the solution pairs  $I_{im}$  and  $\mathbf{q}_{im}$  for all DOFs and all series terms. The buckling stresses are

where  $i$  is the number of DOF and  $m$  is the number of series term.

In the semi-analytical FSM, which combines elements of the classical Ritz method and the FEM, the general form of the displacement function can be written as a product of polynomials and trigonometric functions

where  $Y_m(y)$  are functions from the Ritz method and  $\mathbf{N}_k(x)$  are interpolation functions from FEM [3]. In elastic buckling analysis, three more influential aspects are boundary conditions, strip selection, and mesh.

The most commonly used series are the basic functions (or eigenfunctions) which are derived from the solution of the beam vibration differential equation

$$\frac{\partial^4 Y}{\partial y^4} = \frac{m^4}{a^4} Y \quad (10)$$

gde je  $a$  dužina grede (trake), a  $m$  je parametar.

Opšti oblik osnovnih funkcija jeste

$$Y(y) = C_1 \sin\left(\frac{my}{a}\right) + C_2 \cos\left(\frac{my}{a}\right) + C_3 \sinh\left(\frac{my}{a}\right) + C_4 \cosh\left(\frac{my}{a}\right) \quad (11)$$

s koeficijentima  $C_1$ , itd., koji se određuju iz krajnjih graničnih uslova. Ovo je razrađeno u lit. [3] za različite krajnje granične uslove i navedeno je ispod samo u slučaju slobodno oslonjene konačne trake

$$Y_m(y) = \sin\left(\frac{m_m \cdot y}{a}\right) \quad (m_m = p, 2p, 3p, \dots, m \cdot p). \quad (12)$$

Nepravilnosti mogu biti geometrijske, materijalne i strukturne. Čiste početne geometrijske nepravilnosti su najjednostavnije (sl. 1 [a]) i podrazumevaju da je samo početna geometrija pod uticajem nepravilnosti, a ne naponsko stanje. U ovom slučaju, početne nepravilnosti mogu biti modelirane prvim modom izvijanja  $\mathbf{q}$  ( $m = 1$ ).

### 3.2 Neelastično izvijanje

Ravnotežna jednačina za sistem koji pokazuje nelinearno materijalno ponašanje može biti napisana kao

$$\hat{\mathbf{K}}(\mathbf{C})\mathbf{q} = \mathbf{Q}. \quad (13)$$

Nelinearni član je konvencionalna matrica krutosti  $\hat{\mathbf{K}}$  sistema, koja zavisi od neelastične konstitutivne matrice  $\mathbf{C}$ . Kada je reč o 2D problemima primenom MKT, uobičajeno je da se napiše komplians matrica  $\mathbf{C}^{-1}$  u obliku

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ g_{xy} \end{bmatrix} = \mathbf{C}^{-1} \begin{bmatrix} s_x \\ s_y \\ t_{xy} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}^{-1} = \begin{bmatrix} 1/E_{Rx} & -e_{xy}/E_{Rx} & 0 \\ -e_{xy}/E_{Rx} & 1/E_{Ry} & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{Rxy} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Dok se rešenje linearnih sistema može postići bez teškoća na direktan način, to nije moguće u nelinearnim sistemima. Mnogo šema rešavanja je razvijeno i mogu se naći u mnogim člancima i udžbenicima. U ovom radu metod iteracije modula, koji je zaista isti kao postupak, objašnjen u [10] se primenjuje. On se zasniva na analitičkoj formi rešenja za RDA modul funkciju i napon-deformacija krivu. RDA modul iteracije počinje sa elastičnom konstitutivnom matricom  $\mathbf{C}^E$ .

$$\hat{\mathbf{K}}(\mathbf{C}^E)\mathbf{q} = \mathbf{Q}. \quad (15)$$

Jed. (15) predstavlja linearni sistem jednačina. Rešavanjem ove jednačine, naponi  $\sigma^{(0)}$  i deformacije  $\epsilon^{(0)}$  u svim tačkama 2D kontinuuma mogu biti dobijeni. Ako

where  $a$  is the length of the beam (strip) and  $m$  is a parameter.

The general form of the basic functions is

with the coefficients  $C_1$ , etc., to be determined by the end boundary conditions. This has been worked out in the ref. [3] for various end boundary conditions and is listed below only for a simply supported finite strip

Imperfections can be geometric, material or structural. Purely initial geometric imperfections are most simple, Fig. 1(a), and it implies that only the reference geometry is influenced by imperfection, not the stress state. In this case the initial imperfection may be modelled as the first buckling eigenmode  $\mathbf{q}$  ( $m = 1$ ).

### 3.2 Inelastic buckling

The equilibrium equation for a system exhibiting material non-linear behaviour can be written as

The non-linear term is the conventional stiffness matrix  $\hat{\mathbf{K}}$  of the system, which depends on the inelastic constitutive matrix  $\mathbf{C}$ . It is often convenient, when dealing with 2D problems using the FSM, to write the compliance matrix  $\mathbf{C}^{-1}$  in the form

While the solution of a linear system can be accomplished without difficulty in a direct manner, this is impossible for non-linear systems. A variety of solution schemes have been developed to solve such problems and they can be found in many articles or textbooks. In this paper, a modulus iterative method, which is really the same as the procedure explained in [10] is applied. It is based on the closed form solution for the RDA modulus function and stress-strain curve. The RDA modulus iteration starts with the elastic constitutive matrix  $\mathbf{C}^E$

Eq. (15) presents a linear system of equations. Solving these equations, stresses  $\sigma^{(0)}$  and strains  $\epsilon^{(0)}$  in all points of a 2D continuum can be obtained. When the

je komponenta napona veća od napona na granici elastičnosti, sledeća jednačina može biti korišćena da se dobije bolja aproksimacija [10]

$$s^{(1)} = \frac{1}{2 \cdot K_E} \left( \sqrt{1 + 4 \cdot K_E E(0) |e^{(0)}|} - 1 \right). \quad (16)$$

Međutim, u analizi neelastičnog postizvijajućeg ponašanja ili nelinearnog loma konstrukcija, samo početni naponi i odgovarajuće deformacije moraju biti uključeni. Stoga, sledeći problem svojstvenih vrijednosti može se definisati ovako:

$$[\hat{\mathbf{K}}(\mathbf{C}) - I \mathbf{K}_s] \mathbf{q} = \mathbf{0} \quad (17)$$

sa ulaznim parametrom za prvu postizvijajuću iteraciju

$$E_{Ry}^{(1)} = \frac{3E_H}{(5-4m) + 2(1+m)s_{cr}K_E}. \quad (18)$$

Stoga, novi kritični napon  $s_{cr}^{(1)}$  (VP napon izvijanja ili napon tečenja) može biti sračunat prema jed. (17). Odgovarajuća komponenta deformacije jeste

$$e^{(1)} = \frac{s_{cr}^{(1)}}{E_H (1+j^*)} \left( 1 + s_{cr}^{(1)} K_E \right). \quad (19)$$

stress component is greater than stress at the limit of elasticity the following equation may be used to give a better approximation [10]

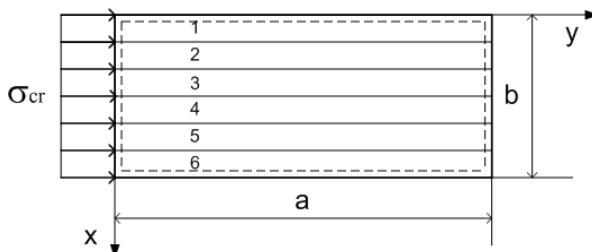
However, in the analysis of inelastic post buckling behaviour or non-linear collapse of structures, only the initial stresses and corresponding strains must be included. Thus, the following inelastic eigenvalue problem may be defined

with input parameter for the first post buckling iteration

Hence, a new critical stress  $s_{cr}^{(1)}$  (inelastic buckling stress or yield stress) may be computed according to Eq. (17). The corresponding component of strain is

#### 4 NUMERIČKI PRIMER

Posmatramo ravnomerno pritisnutu pravougaonu čeličnu ploču ( $a/b=1$ ) prikazanu na sl. 2, čije su ivice slobodno oslonjene.



Slika 2. Ravnomerno pritisnuta pravougaona čelična ploča i njena idealizacija konačnim trakama  
Figure 2. Uniformly compressed rectangular steel plate and finite strip idealization

Ploča sledećih geometrijskih i elastičnih osobina,  $t=16$  mm,  $b=1000$  mm,  $E_H=210$  GPa i  $m=0.3$  (Poissonov koeficijent), analizirana je korišćenjem rezultata testa za faktore redukcije napona tečenja i modula elastičnosti mekog čelika na visokim temperaturama [11].

RDA naponi tečenja dobijeni su korišćenjem test-podataka, datim u Tab. 1 i imajući u vidu sledeće RDA module

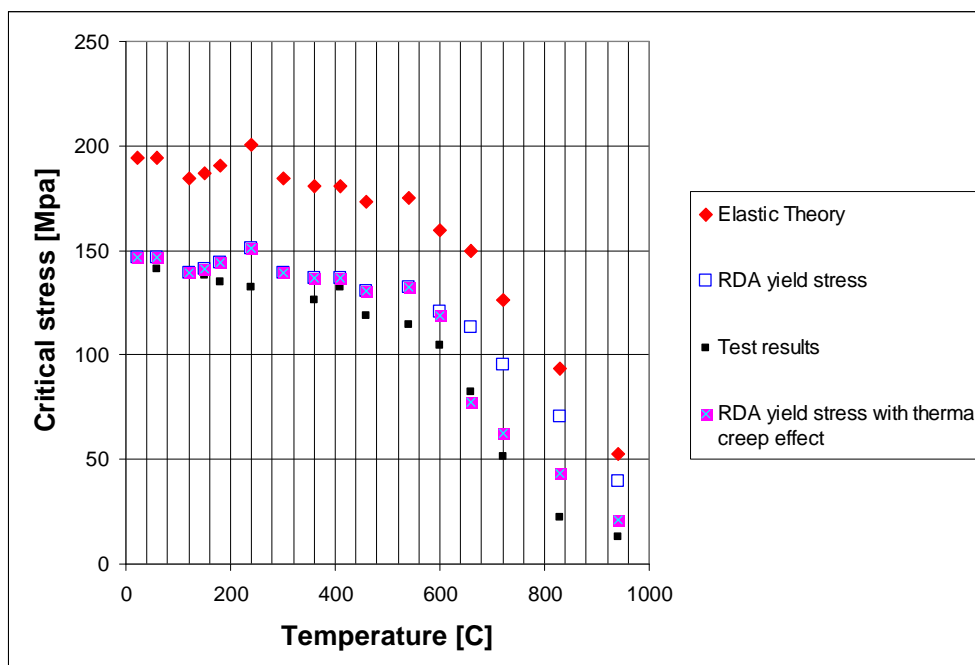
$$E_{R,T,j_T} = \frac{3E_T}{(5-4m) + 2(1+m)(j^* + j_T)} \quad (20)$$

#### 4 NUMERICAL EXAMPLE

Consider the uniformly compressed rectangular steel plate ( $a/b=1$ ) presented in Fig. 2, whose all edges are simply supported.

Plate of the following geometrical and elastic properties,  $t=16$  mm,  $b=1000$  mm,  $E_H=210$  GPa and  $m=0.3$  (Poisson's ratio), was analyzed using the test results for the reduction factors of yield strength and elastic modulus of mild steel at elevated high temperatures [11].

The RDA yield stresses are obtained using the test data given in Tab. 1 and taking into account the following RDA module



Slika 3. Poređenje napona tečenja usled visokih temperatura i opterećenja čelične ploče a/b=1 napravljene od mekog čelika

Figure 3. Comparison of yield stresses due to high temperatures and loading of steel plate a/b=1 made of mild steel

gde su strukturni i termalni koeficijenti tečenja, redom

where the structural and thermal creep coefficients are respectively

$$j^* = \frac{2m}{1-2m}, \quad j_T = \frac{E_H}{E_T} - 1. \quad (21)$$

Tabela 1. Eksperimentalni i sračunati naponi tečenja usled visokih temperatura i opterećenja kod čelične ploče (a/b=1) od mekog čelika

Table 2. Experimental and computed yield stresses due to high temperatures and loading of steel plate (a/b=1) made of mild steel

T [°C]	$E_T/E_H$ [11]	$S_{cr.F.T}$ [MPa]	$E_{R.T}$ [MPa]	$S_{cr.Y.T}$ [MPa]	$j_T$	$E_{R.T.i.}$ [MPa]	$S_{cr.Y.T.i.}$ [MPa]	$D_{cr}$ $d \rightarrow 0$	$f_{0.2,T}/f_{0.2,E}$ [11]	$S_{cr}$ [11] [MPa]
22	1	194.36	81741	146.88	0	81741	146.88	0.60	1	146.88
60	1	194.36	81741	146.88	0	81741	146.88	0.60	0.96	141.00
120	0.95	184.64	77675	139.54	0.053	77675	139.54	0.61	0.95	139.54
150	0.96	186.59	78492	141.01	0.042	78492	141.01	0.61	0.94	138.07
180	0.98	190.48	80128	143.95	0.020	80128	143.95	0.60	0.92	135.13
240	1.03	200.19	84216	151.29	0	84216	151.29	0.60	0.90	132.19
300	0.95	184.64	77675	139.54	0.053	77675	139.54	0.61	0.95	139.54
360	0.93	180.76	76040	136.61	0.075	76040	136.61	0.61	0.86	126.32
410	0.93	180.76	76040	136.61	0.075	76040	136.61	0.61	0.90	132.19
460	0.89	172.98	72769	130.72	0.124	72769	130.72	0.62	0.81	118.97
540	0.90	174.93	73587	132.20	0.111	73587	132.20	0.62	0.78	114.57
600	0.82	159.38	67046	120.45	0.220	62422	118.73	0.63	0.71	104.28
660	0.77	149.66	62957	113.10	0.299	57193	77.11	0.64	0.56	82.25
720	0.65	126.33	53146	95.48	0.538	44974	62.80	0.67	0.35	51.41
830	0.48	93.29	39246	70.51	1.083	28740	43.28	0.72	0.15	22.03
940	0.27	52.48	22076	39.66	2.704	11544	21.13	0.81	0.09	13.22

Budući da razvoj mikropukotina indukuje smanjenje krutosti materijala, stanje oštećenja može biti okarakterisano varijacijom modula elastičnosti  $E_T$ . Stoga, kritičnu varijablu oštećenja  $D_{cr}$  karakteriše varijacija Young-ovog modula  $E(D)$ , kao što sledi

$$(1 - D_{cr})E_T = E_{R,T,j_T} = E_T \frac{1+j+d^2}{(1+j)^2+d^2} \Rightarrow_{d \rightarrow 0} D_{cr} = \frac{j^*+j_T}{1+(j^*+j_T)}. \quad (22)$$

## 5 ZAKLJUČAK

U analizi problema termo-visko-plastičnosti i tečenja u strukturno materijalnom odzivu analizirana su dva tipa nelinearnosti (geometrijski usled velikih pomeranja i materijalni usled neelastičnog ponašanja). Ovaj rad pokazao je da kritična varijabla oštećenja  $D_{cr}$ , usled  $d \rightarrow 0$  strukturnog  $j^*$  i ukupnog  $(j^*+j_T)$  koeficijenta tečenja, jeste veoma slična za temperature u rasponu od 22 do 540 °C i veoma različita za temperature u rasponu od 600 do 940 °C.

## Zahvalnost

Ovaj rad deo je istraživanja u okviru projekta OI 174027 i TR 36017, koji podržava Ministarstvo za obrazovanje i nauku. Autor D. D. Milašinović na tome zahvaljuje.

## 6 LITERATURA REFERENCES

- [1] Kraus, H. 1980. Creep Analysis. New York: J. Wiley & Sons.
- [2] Kojić, M. 1997. Computational Procedures in Inelastic Analysis of Solids and Structures. Kragujevac: Faculty of Mechanical Engineering in Kragujevac.
- [3] Milašinović, D.D. 1997. The Finite Strip Method in Computational Mechanics. Subotica: Faculties of Civil Engineering: University of Novi Sad, Technical University of Budapest and University of Belgrade.
- [4] Milašinović, D.D. 2010. Rheological-dynamical analogy: design of viscoelastic and viscoplastic bar dampers. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 14(4), 389-409.
- [5] Milašinović, D.D. 2007. Rheological-dynamical analogy: prediction of damping parameters of hysteresis damper. *International Journal of Solids and Structures*, 44(22-23), 7143-7166.
- [6] Kostić, S.M., Deretić-Stojanović, B. 2016. Fiber element formulation for inelastic frame analysis. *Building Materials and Structures*, 59(2), 3-13.

Since the development of micro cracks induces a reduction in the stiffness of materials, the damage state can also be characterized by variation in the elastic modulus  $E_T$ . Thus, the critical damage variable  $D_{cr}$  is characterized by variation in Young's modulus  $E(D)$ , as follows

## 5 CONCLUSION

Two source of non-linearity (geometrical non-linearity due to large deflection and material non-linearity due to inelastic behavior) are analyzed for the problem of thermo-visco-plasticity and creep in structural-material response. This paper shows that the critical damage variables  $D_{cr}$  due to the structural  $j^*$  and total  $(j^*+j_T)$  creep coefficients are quite similar for the temperature ranging from 22 to 540 °C and very different for temperature ranging from 600 to 940 °C.

## Acknowledgements

The work presented in this paper is a part of the investigation conducted within the research projects OI 174027 "Computational Mechanics in Structural Engineering" and TR 36017 "Utilization of by-products and recycled waste materials in concrete composites for sustainable construction development in Serbia: investigation and environmental assessment of possible applications", supported by the Ministry of Science and Technology, Republic of Serbia. This support is gratefully acknowledged.

- [7] Čosić, M., Folić, R., Brčić, S. 2017. An overview of modern seismic analyses with different ways of damping introduction. *Building Materials and Structures*, 60(1), 3-30.
- [8] Milašinović, D.D. 2011. Geometric non-linear analysis of thin plate structures using the harmonic coupled finite strip method. *Thin-Walled Structures*, 49(2), 280-290.
- [9] Milašinović, D.D. 2012. Harmonic coupled finite strip method applied on buckling-mode interaction analysis of composite thin-walled wide-flange columns. *Thin-Walled Structures*, 50(1), 95-105.
- [10] Milašinović, D.D. 2015. Rheological-dynamical continuum damage model for concrete under uniaxial compression and its experimental verification. *Theoretical and Applied Mechanics*, 42(2), 73-110.
- [11] Chen, J., Young, B. 2006. Behavior of High Strength Structural Steel at Elevated Temperatures. *Journal of Structural Engineering*, 132(12) 1948-1954.



## TERMO-VISKO-PLASTIČNOST I TEČENJE U STRUKTURNO-MATERIJALNOM ODZIVU POLIEDARSKIH KONSTRUKCIJA

Dragan D. MILAŠINOVIĆ

Mnogi konstruktivni delovi izloženi su visokim temperaturama i opterećenju. Tada je važno imati podatke o neelastičnom ponašanju pod takvim uslovima eksploatacije. Uticaj temperature na karakteristike materijala može biti uključen putem koeficijenta tečenja u području visko-elasto-plastičnih (VEP) deformacija. Ovaj parametar oštećenja primjenjuje se u ovom radu, zajedno s matematičko-materijalnim modeliranjem, pod nazivom reološko-dinamička analogija (RDA), s ciljem rešavanja smanjenja krutosti konstrukcija zbog neelastičnog ponašanja materijala. Cilj ovog rada jeste da se definiše strukturno-materijalno unutrašnje prigušenje na osnovu oba parametra, RDA dinamičkog modula i modalnog koeficijenta prigušenja, modelovanjem kritično prigušenih dinamičkih sistema u stabilnom stanju odziva. Ovi sistemi su kredibilna osnova za objašnjenje fenomena termo-visko-plastičnosti i tečenja u strukturno-materijalnom odzivu zbog uticaja visokih temperatura i opterećenja.

Iako informacija o elastičnom izvicanju za poliedarske konstrukcije nije direktni pokazatelj kapaciteta nosivosti ili loma, oba podatka – oblik izvicanja i kritična sila (kritični moment) – važni su za objašnjenje stvarnog ponašanja. U sadašnjim propisima AISI S100, Novi Zeland / Australija, i Evropska unija, proračunske formule podešene su na osnovu elastičnog kritičnog opterećenja (kritičnog momenta), kako bi predvidele kapacitet nosivosti, čime je sračunavanju elastičnog kritičnog opterećenja (kritičnog momenta) dat veliki značaj. Štaviše, oblici izvicanja obično se koriste pri nelinearnom lomu, modelovanju početnih geometrijskih nepravilnosti i termičkih uticaja u poliedarskim konstrukcijama koje su izložene požaru.

Da bi se ispitalo izvijajuće ponašanje poliedarskih konstrukcija, glavne numeričke metode rešavanja predstavljaju metod konačnih elemenata (MKE) i metod konačnih traka (MKT). Cilj ovog rada jeste da obezbedi jedinstven okvir za proračune kvazistatičkog nelinearnog izvicanja i toplotnog opterećenja u slučaju ravnomerno pritisnutih poliedarskih konstrukcija koristeći MKT.

**Ključne reči:** Termo-visko-plastičnost, tečenje, RDA, opterećenje, visoka temperatura, poliedarske konstrukcije, neelastično izvicanje, termalno opterećenje, MKT

## THERMO-VISCO-PLASTICITY AND CREEP IN STRUCTURAL-MATERIAL RESPONSE OF FOLDED-PLATE STRUCTURES

Dragan D. MILASINOVIC

Many structural parts are exposed to high temperatures and loading. It is then important to have data about material inelastic behaviour under such exploiting conditions. Influence of temperature on mechanical characteristics of a material may be inserted via the creep coefficient in the range of visco-elasto-plastic (VEP) strains. This damage parameter is implemented in this paper in conjunction with mathematical material modelling approach named rheological-dynamical analogy (RDA) in order to address structural stiffness reduction due to inelastic material behaviour. The aim of this paper is to define structural-material internal damping based on both the RDA dynamic modulus and modal damping ratio, by modelling critically damped dynamic systems in the steady-state response. These systems are credible base for explanation of the phenomenon of thermo-visco-plasticity and creep in structural-material response due to high temperatures and loading.

Though elastic buckling information for folded-plate structures is not a direct predictor of capacity or collapse behaviour on its own, both the mode and the load (moment) are important proxies for the actual behaviour. In current design codes, such as AISI S100, New Zealand/Australia, and European Union, the design formulae are calibrated through the calculation of elastic critical buckling loads (or moments) to predict the ultimate strength, thus the ability to calculate the associated elastic buckling loads (or moments) has great importance. Moreover, the buckling mode shapes are commonly employed into non-linear collapse modelling as initial geometric imperfections and thermal performance of folded-plate structures in fire.

To examine the buckling behaviour of folded-plate structures, the main numerical solution methods are used such as the finite element method (FEM) and finite strip method (FSM). This paper aims at providing a unified frame for quasi-static inelastic buckling and thermal loading of uniformly compressed folded-plate structures using the FSM.

**Key words:** Thermo-visco-plastic, creep, RDA, loading, high temperatures, folded-plate structures, inelastic buckling, thermal loading, FSM



# INDIKATORI OŠTEĆENJA OBIČNIH NEARMIRANIH ZIDANIH ZIDOVA IZLOŽENI SEIZMIČKIM DJELOVANJIMA

## DAMAGE INDICATORS FOR UNREINFORCED MASONRY BUILDING WALLS SUBJECTED TO SEISMIC ACTIONS

Naida ADEMOVIĆ  
Daniel V. OLIVEIRA

ORIGINALNI NAUČNI RAD  
ORIGINAL SCIENTIFIC PAPER  
UDK: 692.2.042.7  
doi:10.5937/GRMK1704017A

### 1 UVOD

Seizmička aktivnost u Bosni i Hercegovini (BiH) uzrokovana je postojanjem dubokih, lateralnih i reverznih rasjeda. Tektonska aktivnost ovog područja povezana je i s činjenicom da drugi po veličini pojas (Alpski pojas) prelazi preko Bosne i Hercegovine, a proteže se od Himalaja, preko Irana Turske i Grčke [1, 2, 3, 4]. Prema evromediteranskoj seizmičkoj mapi rizika, BiH se svrstava u zemlje sa srednjim stepenom seizmičkog rizika, s vršnim ubrzanjem tla (PGA) u rasponu od 0,08 do 0,24 g, dok je jugozapadni dio zemlje okarakterisan visokim rizikom (PGA>0,24 g).

Konstrukcija koja je prikazana u ovom članku (vidjeti sliku 1) karakteristična je za široko područje Zapadnog Balkana, građena pedesetih i šezdesetih godina prošlog stoleća. Više detalja o tipologiji same konstrukcije može se naći na drugim mjestima [1, 2, 3, 4]. Ova vrsta nearmirane (URM) obične zidane konstrukcije izgrađena je od industrijskih opečnih elemenata, ali bez vertikalnih sekrlaža. Osjetljivost ovih konstrukcija povezana je s njihovom velikom visinom, lokacijom nosivih zidova koji se nalaze uglavnom samo u jednom pravcu i činjenicom da nema vertikalnih armiranobetonskih (AB) sekrlaža. Razaranje ove vrste zgrada dobro je dokumentovano nakon zemljotresa u Skoplju 1963. godine (prikazano na slici 2).

---

Naida Ademović, Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Sarajevo, Patriotske lige 30, 71000 Sarajevo, [naidadem@yahoo.com](mailto:naidadem@yahoo.com)  
Daniel V. Oliveira, Associate Professor, ISISE, University of Minho, Depart. Civil Engineering, Portugal, [danvco@civil.uminho.pt](mailto:danvco@civil.uminho.pt)  
Corresponding email: [naidadem@yahoo.com](mailto:naidadem@yahoo.com)

### 1 INTRODUCTION

Seismic activity in Bosnia and Herzegovina (B&H) is connected to the existence of deep lateral and reverse faults. The fact that the second biggest belt (Alpine Belt), going from the Himalayas over Iran, Turkey and Greece, passes through B&H verifies the tectonic activity of this region [1,2,3, 4]. As per Euro Mediterranean Seismic Hazard Map, B&H falls in the Moderate Seismic Hazard having the peak ground acceleration (PGA) in the range of 0.08 to 0.24g, while a south-west part of the country experiences a High Hazard (PGA>0.24g).

The building presented in this paper (see Figure 1) is characteristic for the wider region of Western Balkans, built in the 1950's and 1960's. More details about the building typology can be found elsewhere [1,2,3, 4]. This type of unreinforced masonry (URM) buildings were constructed with industrial bricks, but without vertical confining elements. The vulnerability of these buildings lies in its high height, structural walls placed mostly in only one direction and the fact that there is no vertical reinforced concrete (RC) confining elements. The devastation of this type of buildings is well documented after the 1963 Skopje earthquake, as illustrated in Figure 2.

---

Naida Ademović, Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Sarajevo, Patriotske lige 30, 71000 Sarajevo, Bosnia and Herzegovina  
[Herzegovinanaidadem@yahoo.com](mailto:Herzegovinanaidadem@yahoo.com)  
Daniel V. Oliveira, Associate Professor, ISISE, University of Minho, Depart. Civil Engineering, Portugal, [danvco@civil.uminho.pt](mailto:danvco@civil.uminho.pt)  
Corresponding email: [naidadem@yahoo.com](mailto:naidadem@yahoo.com)



Slika 1. Analizirana zgrada u Sarajevu, Bosna i Hercegovina (fotografisao autor)  
Figure 1. Analyzed building in Sarajevo, Bosnia and Herzegovina (authors' photo)



Slika 2. Karakteristična zgrada nakon zemljotresa u Skoplju [14]  
Figure 2. Characteristic building damaged after Skopje earthquake [14]

## 2 DINAMIČKE KARAKTERISTIKE

Dinamičke metode identifikacije često se koriste za određivanje dinamičkih karakteristika (sopstvenih frekvencija i sopstvenih oblika) građevinskih konstrukcija. Ove dinamičke karakteristike važne su za razumijevanje dinamičkog ponašanja konstrukcija izloženih djelovanjem zemljotresa.

Odgovarajući sopstveni oblici i sopstvene frekvencije dobijene pomoću proračuna konačnim elementima (FEM) [1, 2] prikazani su na slikama 3 (a), (b) i (c). Prvi sopstveni oblik jeste preovlađujući način odgovora s najvećim efektivnim doprinosom modalne mase u pravcu x (67,33%). Ovo je „tipično ponašanje” zidne konstrukcije s čvrstim vezama između zidova i ploče (efekat dijafragme).

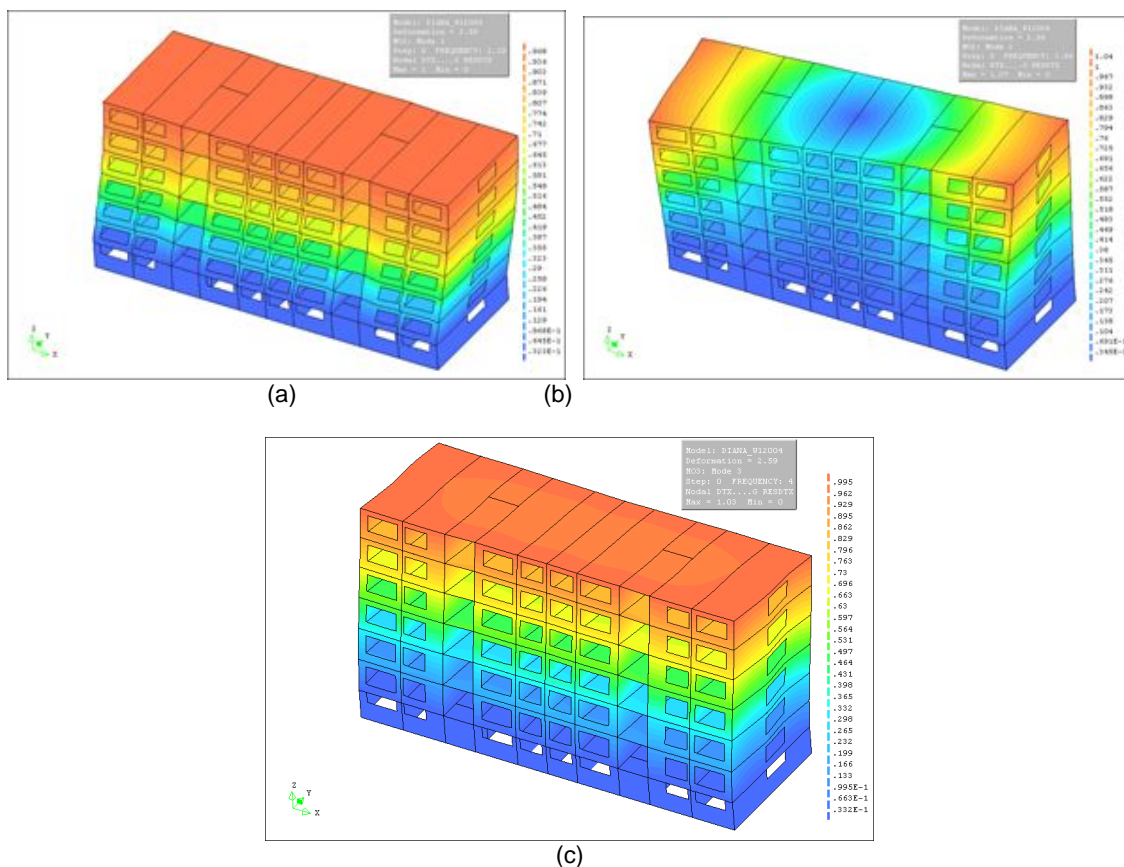
Vrijednosti frekvencija uspoređene su s podacima datim u [20], pri čemu se ističe to da za više konstrukcije „čak i za konstrukcije koje su na 11 etaža, vrijednosti su blizu 2 Hz iako su konstrukcije napravljene od različitog materijala”. Ovo je veoma važno da bi se model mogao verifikovati s vrijednostima dobijenim na osnovu eksperimenata.

## 2 DYNAMIC CHARACTERISTICS

Dynamic identification methods are often used for determination of the vibration characteristics (eigen-frequencies and mode shapes) of civil engineering structures. These dynamic characteristics are important for understanding the dynamic behaviour of structures under earthquake actions.

The relevant eigen-modes and eigen-frequencies obtained by the FEM calculations [1, 2] are presented in Figure (a), (b) and (c). The first mode is the prevailing mode of the response with the largest effective modal mass contribution in the x-direction (67.33%). This is a "typical" box behaviour of a masonry structure with stiff connections between the walls and the slab (diaphragm effect).

The value of the frequencies were compared with the data provided by Tomažević [20], indicating that for higher structures, "even up to 11-storeys the values are close to 2Hz even though buildings have been built with different materials". This is very important in order to be able to "verify" the model as there are no experimental data.



Slika 3. Sopstveni oblici i sopstvene frekvencije (a) Prvi sopstveni oblik  $f_1=2.19$  Hz ( $T_1=0.46$ s); (b) Drugi sopstveni oblik  $f_2=3.85$  Hz ( $T_2=0.26$ s); (c) Treći sopstveni oblik  $f_3=4.00$  Hz ( $T_3=0.25$ s)

Figure 3. Eigen modes and eigenfrequencies: (a) First mode  $f_1=2.19$  Hz ( $T_1=0.46$ s); (b) Second mode  $f_2=3.85$  Hz ( $T_2=0.26$ s); (c) Third mode  $f_3=4.00$  Hz ( $T_3=0.25$ s)

### 3 HIPOTEZA DIJAFRAGME

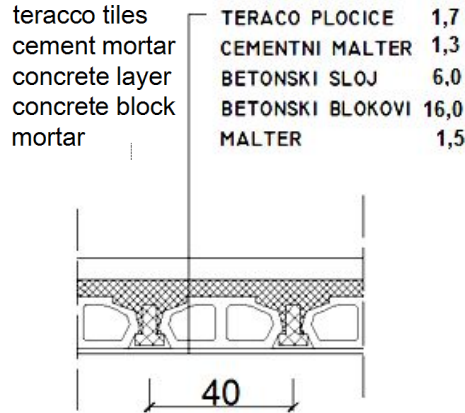
Kada su izloženi djelovanju zemljotresa, oblici loma uzrokovani smicanjem (poprečnom silom) dokazani su tipom objekta koji je analiziran, te se naglašava kritičan aspekt degradacije krutosti, kao indikatora oštećenja, zidanih zidova. Za zidane konstrukcije sa armiranim betonskim međuspratnim tavanicama, horizontalna stropna opterećenja raspoređena su u skladu s krutošću vertikalnih otpornih elemenata. U primjeru postojeće konstrukcije [1, 2] koja je istražena i modelirana, dokazano je to da se međuspratne konstrukcije od polumontažnih „Herbst“ betonskih šupljih elementa (slika 4) ponašaju kao krute tavanice (dijafragme).

Kako bi se verificovala i potvrdila hipoteza o krutom ponašanju tavanica, konstrukcija je izložena djelovanjem horizontalnog ubrzanja u „ $\pm Y$ “ pravcu (vidjeti sliku 5) primjenom *pushover* analize. Odabran je kontrolni čvor u liniji simetrije na nivou krova čvor 44014, kao što je prikazano na slici 5, a također su odabrana i dva dodatna čvora u istoj liniji (čvorovi 44035 i 43935). Numerička analiza sprovedena je upotrebom softvera DIANA 9.4 [8]. Radi jednostavnosti, svi detalji o modeliranju i *pushover* analizi također su dati na drugim mjestima [1, 2].

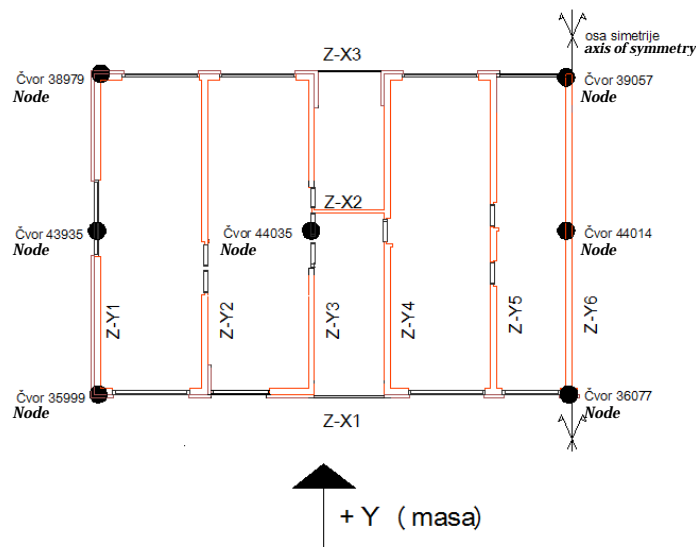
### 3 DIAPHRAGM HYPOTHESIS

When subjected to earthquakes, the shear failure mode evidenced by the building typology studied highlights the critical aspect of stiffness degradation, as a damage indicator, of the masonry walls. For the masonry structures with reinforced concrete slabs the horizontal floor loads are distributed according to the stiffness of the vertical resisting elements. In the example of the existing structure [1,2] that has been investigated and modelled, it was proven that slabs made of semi-prefabricated elements "Herbst" concrete hollow elements (Figure 4) behave as a rigid floor (diaphragm).

In order to verify and confirm the hypothesis of rigid floor behaviour, the structure was exposed to a horizontal acceleration in the " $\pm Y$ " direction (see also Figure 5), by means of a pushover analysis. A control node was chosen in the line of symmetry at the roof level, node no. 44014, as shown in Figure 5, and two additional nodes in the same line where also selected (nodes 44035 and 43935). The numerical analysis was performed in DIANA 9.4 software [8]. For the sake of simplicity, all the details about modelling and pushover analysis are provided elsewhere [1,2].



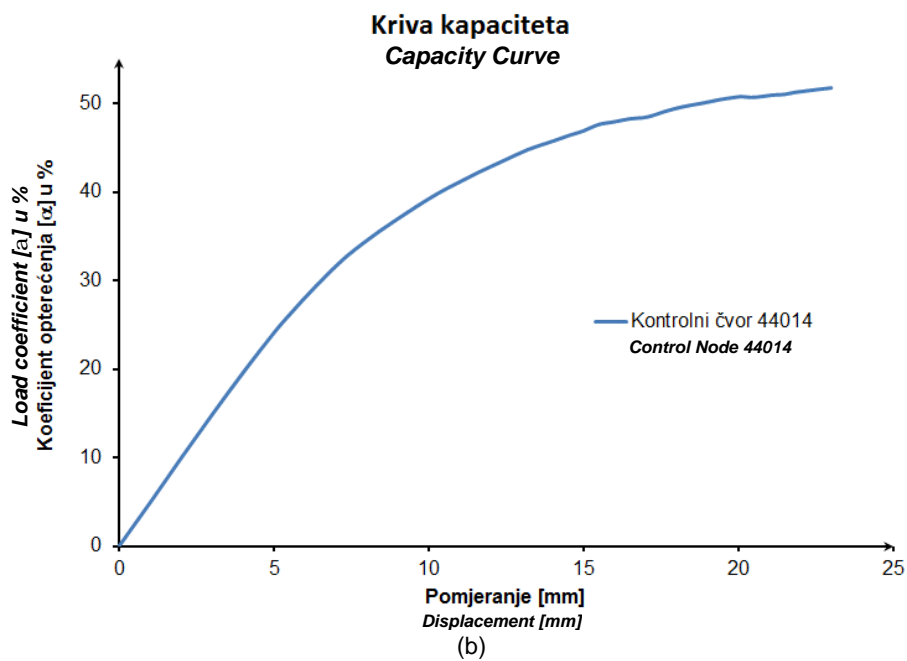
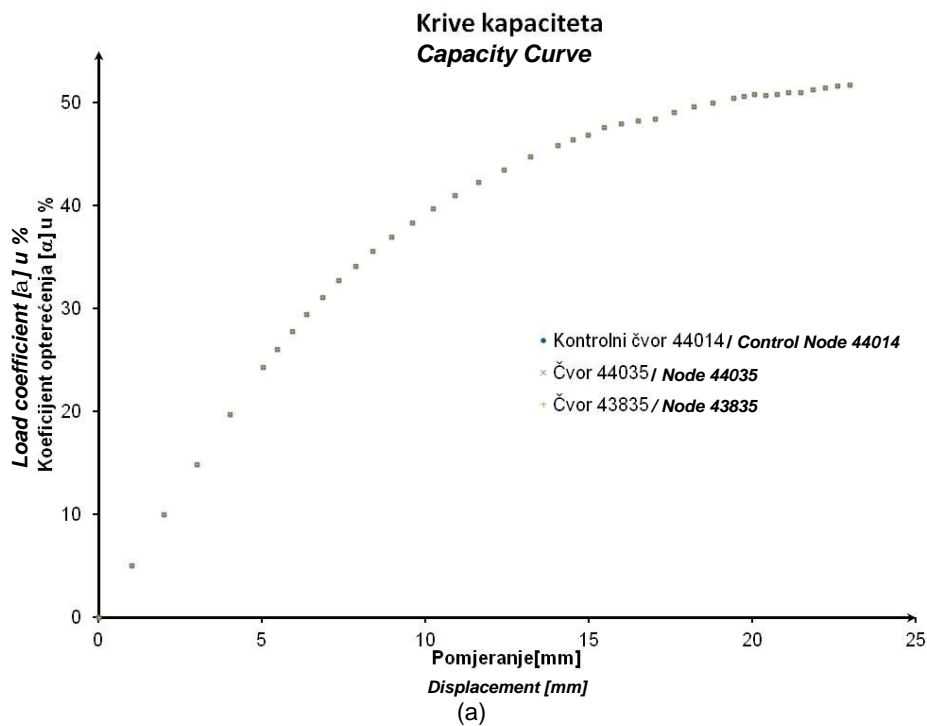
Slika 4. Polumontažni betonski element  
Figure 4. Semi-prefabricated concrete elements



Slika 5. Pozicija čvorova; oznaka zidova; pravac horizontalne sile  
Figure 5. Location of the nodes; wall labelling; and direction of the horizontal force

Razmatrano je pomjeranje čvorova na vrhu konstrukcije u istoj horizontalnoj liniji (43935, 44035 i 44014, vidjeti sliku 6), kako bi se dokazala pretpostavka o krutim međuspratnim tavanicama. Metoda postupnog naguravanja (pushover) izvršena je u smjeru „ $\pm Y$ “, ovdje će se pokazati samo pravac „ $+ Y$ “ za potvrđivanje hipoteze o krutoj međukatnoj tavanici. Pomjeranja ovih čvorova, kao što je prikazano na slici 6, jesu jednaka, što ukazuje na kruto ponašanje ploča. Pored toga, provjereno je i pomjeranje čvorova 38979 i 39057 i utvrđeno je da postoji jako mala rotacija, manja od 5 stepeni, što se u ovom slučaju može zanemariti. Ovo može biti povezano s „ne u potpunosti“ simetričnom konstrukcijom [1].

The movement of the nodes at the top of the structure in the same horizontal line (43935, 44035 and 44014, see Figure 6) were investigated in order to prove the assumption of the rigid floors. A pushover analysis was conducted in the „ $\pm Y$ “ direction, here only „ $+ Y$ “ direction will be shown for the confirmation of the rigid floor hypothesis. The movements of these nodes, as seen in Figure 6, are the same indicating a rigid behaviour of the slabs. Additionally, the displacement of nodes 38979 and 39057 was checked and it has been seen that there is a very small rotation less than 5 degrees, which in this case can be neglected. This may be connected to the "not completely" symmetric structure [1].



Slika 6. (a) Kriva kapaciteta za čvorove 44014, 44055 and 43935 u + Y smjeru,  
(b) Kriva kapaciteta za čvorove 44014 u + Y smjeru

Figure 6. (a) Pushover Curves for Nodes 44014, 44055 and 43935 in + Y direction,  
(b) Pushover Curve for Nodes 44014 in + Y direction

#### 4 DINAMIČKA NEELASTIČNA ANALIZA

Konstrukcija je izložena djelovanju kratkotrajnog zemljotresa (koji se desio u Crnoj Gori, na lokaciji grada Petrovca, 15. aprila 1979. godine, s maksimalnim ubrzanjem tla u vrijednosti od 0,43 g), s ciljem da se što kvalitetnije analizira dinamički odgovor konstrukcije. Ovo je jedan od akcelelograma koji se koristi veoma često prilikom verifikacija odgovora konstrukcija širom bivše Jugoslavije [19, 20]. Potrebno je spomenuti i to da razlike u geofizičkim karakteristikama tla između Petrovca i Sarajeva nisu uzete u obzir u ovom slučaju. Akcelelogram je skaliran s ciljem da ima maksimalno ubrzanje PGA u vrijednosti od 0,1 g, što odgovara Zoni VII MCS-skale, kojoj pripada sarajevsko područje, te gdje je konstrukcija i locirana. Sprovedeno je filtriranje potresa pomoću softvera Seismosignal [18]. Uzeta vrijednost prigušenja ( $\xi$ ) iznosila je 5%.

##### 4.1 Karakteristike prigušenja

Klasična hipoteza prigušenja, konkretno Rayleigh-ovo prigušenje, slika 7, odabrana je jer konstrukcija ima isti konstruktivni sistem i isti materijal cijelom visinom objekta. Rayleigh-ovo prigušenje sastoji se od dvije komponente – prve koja je proporcionalna masi i druge koja je proporcionalna krutosti, a definirano je putem slijedeće jednačine [6].

$$c = a_0 m + a_1 k$$

gdje su  $a_0$  i  $a_1$  prvi i drugi Rayleigh-jev koeficijent.

#### 4 TIME HISTORY ANALYSIS

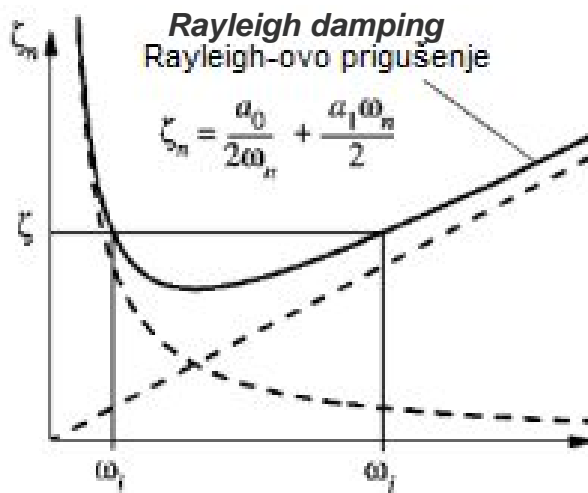
The structure was exposed to the 1979 Petrovac short-period earthquake recorded during the earthquake in Petrovac on 15 April 1979, (Montenegro), with peak acceleration of 0.43g, in order to analyze the dynamic response of the structure. This is one of the accelerograms being frequently used for different verifications throughout former Yugoslavia [19,20]. The differences in the soil conditions between Sarajevo and Petrovac in this case were not taken into account in this case. The accelerogram was scaled in order to have a maximum PGA of 0.1g corresponding to the Zone VII (MCS-Scale) for the Sarajevo region, where the building is located, and filtered using the software Seismosignal [18]. The value for the damping ratio ( $\xi$ ) was taken as 5%.

##### 4.1 Damping characteristics

The classical damping hypothesis, precisely the Rayleigh damping, shown in Figure 7, has been chosen since the building has a similar structural system and structural material over its height. Rayleigh damping composes of mass-proportional and stiffness proportional damping defined by the following equation [6].

$$c = a_0 m + a_1 k$$

where  $a_0$  and  $a_1$  are the first and second Rayleigh coefficients.



Slika 7. Rayleigh-ovo prigušenje [1]  
Figure 7. Rayleigh damping [1]

Pretpostavlja se da sopstveni oblici imaju isti iznos viskoznog prigušenja – u vrijednosti od  $\xi=5\%$  [5, 6, 9, 13, 19], što je uobičajeno potvrđeno putem eksperimentalnih ispitivanja. Rayleigh-evi koeficijenti mogu se proračunati iz slijedećih jednačina:

$$a_0 = \xi \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j}, \quad i / \text{ and } \quad a_1 = \xi \frac{2}{\omega_i + \omega_j}$$

It is assumed that the modes have the same damping ratio of  $\xi=5\%$  [5, 6, 9, 13,19], usually supported by experimental data, then the Rayleigh's coefficients are calculated by the following equations:



gdje su  $\omega_i, \omega_j$ : ugaone frekvencije za tonove "i" i "j".

Veoma je značajno to što se prilikom izbora tonova  $i$  i  $j$  odaberu vrijednosti, kako bi se obezbijedila razumna vrijednost prigušenja u svim tonovima koji daju svoje učešće prilikom odgovora konstrukcije. Frekvencije prvog i trećeg tona uzete su u obzir, iako kumulativna efektivna modalna masa iznosi 73%, jer je doprinos ostalih tonova mali. Na taj način, učešće viših (neželjenih) tonova biće izbjegnuto.

Prilikom proračuna, koristila se Newton-Raphson iteraciona metoda, a za sistem intergacije bilo je neophodno da se koristi Hilbert-Hughes-Taylor (HHT) metoda u softveru DIANA 9.4 [8]. HHT metoda (poznata kao  $\alpha$  metoda) predstavlja uopšteni oblik Newmark-ove metode. Koristeći navedenu metodu, moguće je uvesti numeričku disipaciju u slučaju viših tonova, a da pri tome ne dođe do degradacije stepena tačnosti [8].

Razlog za primjenu HHT metode leži u činjenici da zidane konstrukcije imaju izrazito nisku čvrstoću na zatezanje, prema tome postoji veoma brz prelaz s linearno-elastičnog ponašanja na trenutno ispućalo stanje, a da pri tome maltene vrijednost krutosti iznosi nula. Ovo sve uzrokuje problem konvergencije, te imajući u vidu to što se matrica krutosti u svakom slijedećem koraku ažurira, to opterećuje sam proračun. Drugo, ova metoda pokazala se kao jako korisna prilikom simulacije dinamičkih djelovanja s velikim brojem stepena slobode kretanja [1, 2, 11].

Odabran je inkrement od  $\Delta t = 0,01$  sec zbog vrijednosti najznačajnijih perioda konstrukcije i potrebe da se dobije tačan odgovor u vremenu.

## 4.2 Konstitutivni zakoni pri modeliranju

Za definisanje nelinearnog ponašanja zidane konstrukcije korišćen je *Total Strain Fixed Crack Model* u softverskom programu Diana [8]. Kod ovog modula, pukotine su fiksirane u pravcu glavnih vektora relativnih deformacija koje se ne mijenjaju prilikom opterećenja konstrukcije.

Slika 8 pokazuje nelinearno ponašanje zidane konstrukcije, pri čemu je odabrana parabolična veza zakonitosti napon – relativna deformacija za pritisak koji se zasniva na Hill-ovom kriteriju tečenja (*Hill-type yield criterion*), bez lateralnog omeđivanja (*no lateral confinement*) i bez smanjenja pukotina u lateralnom pravcu, s čvrstoćom na pritisak – koja iznosi  $f_c = 4,07$  N/mm<sup>2</sup> i odgovarajućom energijom loma pri pritisku – koja je jednaka vrijednosti od  $G_c = 6,51$  N/mm. Ponašanje na smicanje, nakon dostizanja pukotina, definisano je na taj način što se uzeo u obzir faktor zadržavanja (*retention factor*) njegovog linearnog ponašanja, koji smanjuje kapacitet na smicanje prema slijedećoj jednačini:

$$G^{cr} = \beta_r \cdot G \quad (1)$$

gdje je  $\beta_r$  (*retention factor*) koji se kreće u granicama od  $0 < \beta_r \leq 1$ , a  $G$  predstavlja modul smicanja za neispućali materijal.

Zakonitost napon - relativna deformacija za zatezanje određena je prema Rankine-ovom kriteriju tečenja (*Rankine type criterion*), i opisana je putem eksponen-

where  $\omega_i, \omega_j$  are angular frequencies of the  $i$ -th and  $j$ -th mode.

Correct choice of modes  $i$  and  $j$  is essential in order to ensure reasonable values for the damping ratios in all the modes contributing to the response. Frequencies of the mode 1 and 3 were taken in the analysis, even though the cumulative effective modal mass was of 73%, as the contribution of the other modes was rather low. In this way the contribution of the undesirable higher modes is avoided.

The Newton-Raphson iteration method was used in this computation, while it was necessary to use an implicit Hilbert-Hughes-Taylor (HHT) method in DIANA 9.4 [8], for time integration. The HHT method (known as  $\alpha$  methods) is actually a generalization of the Newmarks method. By this method it is possible to introduce numerical dissipation in higher modes without degrading the order of accuracy [8].

The reasoning behind the adoption of the HHT method lies in the fact that masonry has a very low tensile strength, so there is a rapid transition from the elastic range to the fully cracked stage with development of a large number of distributed cracks, leading to almost no stiffness. This all leads to problems of convergence and, additionally taking into account that the stiffness matrix has to be updated at each step, making the calculation time consuming. Secondly, this method has proven useful in structural dynamic simulations with many degrees of freedom. [1, 2, 11].

The increment value of  $\Delta t = 0.01$  sec was selected due to the values of the most important periods of the structure and the need to have an accurate time response.

## 4.2 Constitutive modelling laws

Physical non-linear behaviour of the masonry walls is defined through the total strain fixed crack model detailed in Diana [8]. In this way the cracks are fixed in the direction of the principal strain vectors being unchanged during the loading of the structure.

For hysteretic behaviour of masonry as indicated in Figure 8 parabolic stress-strain relation for compression, based on Hill-type yield criterion, was chosen with no lateral confinement and no lateral crack reduction, with the compressive strength in the value of, and the corresponding compressive fracture energy amounting to  $G_c = 6,51$  N/mm.

The post-cracked shear behaviour was defined by taking into account the retention factor of its linear behaviour, which reduces its shear capacity according to the following equation:

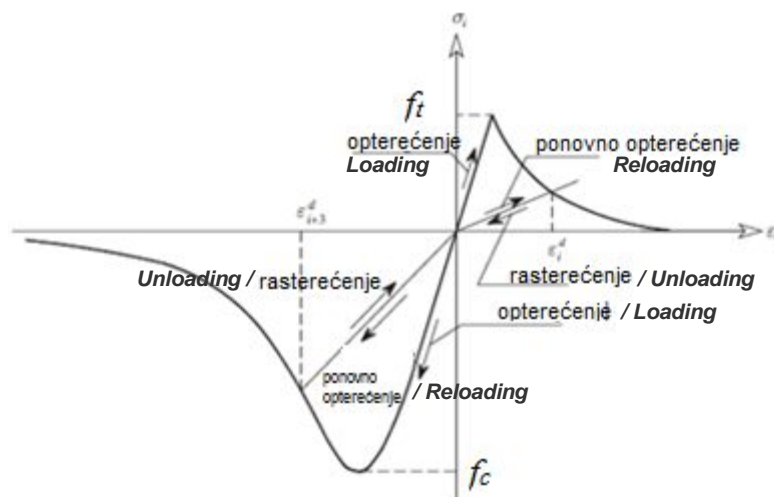
Where  $\beta_r$  is the retention factor  $0 < \beta_r \leq 1$ , and  $G$  is the shear modulus of the uncracked material.

Tension path, based on Rankine-type yield criterion, was described by an exponential tension softening diagram having a tensile strength of  $f_t = 0.2$  N/mm<sup>2</sup>, and respectively the tensile fracture energy being equal to

cijalnog dijagrama zatezanje - omekšavanja s čvrstoćom na zatezanje u vrijednosti od  $f_t = 0,2 \text{ N/mm}^2$ ; shodno tome, energija loma pri zatezanju iznosi  $G_f = 0,1 \text{ N/mm}$ . Retention factor za smicanje,  $b_r$ , jednak je 0.01, što je vrijednost koja je zadana u modelu. Ovo znači da će čvrstoća na smicanje biti umanjena za jedan postotak u odnosu na početnu vrijednost čvrstoće na smicanje kada dođe do formiranja pukotina [1, 2].

$G_f = 0,1 \text{ N/mm}$ .

The shear retention factor,  $b_r$ , was left at the default value of 0.01. This means that the shear strength of the material will be reduced to one percent of the original shear strength when cracks form. [1, 2].



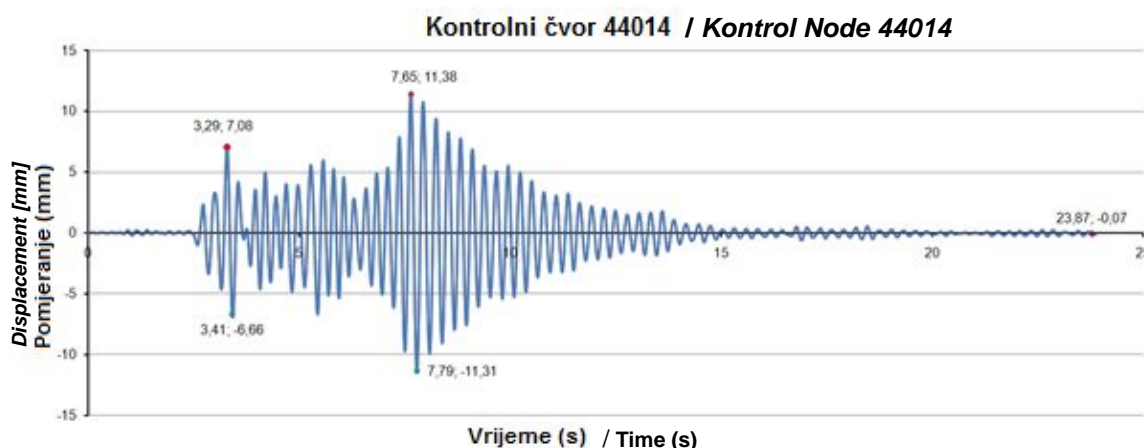
Slika 8. Nelinearne karakteristike materijala [1, 2, 11]  
Figure 8. Hysteretic Behaviour of Masonry [1, 2, 11]

### 4.3 Analiza i diskusija rezultata

Da bi se mogao vidjeti razvoj oštećenja i degradacija krutosti konstrukcije, kao indikatora oštećenja, neophodno je da se analizira razvoj oštećenja (distribucija glavnih zatežućih relativnih deformacija) u različitim koracima. Na osnovu rezultata proračuna, napravljen je dijagram pomjeranja u funkciji vremena za kontrolni čvor 44014, što je prikazano na slici 9. Odabrano je nekoliko tačaka (koraka) tokom djelovanja zemljotresa i izvršena je evaluacija degradacije krutosti. Vremenski koraci koji su odabrani prikazani su na slici 9.

### 4.3 Analysis and discussion of Results

In order to view the development of the damage and stiffness degradation, as a damage indicator, in the structure it was necessary to investigate the damage pattern (principal tensile strains distribution) in different time steps. The displacement vs. time of the control node 44014 was chosen and plotted as indicated Figure 9. Several time instances during the earthquake action are presented and stiffness degradation evaluated. The time instances that have been selected are indicated in Figure 9.

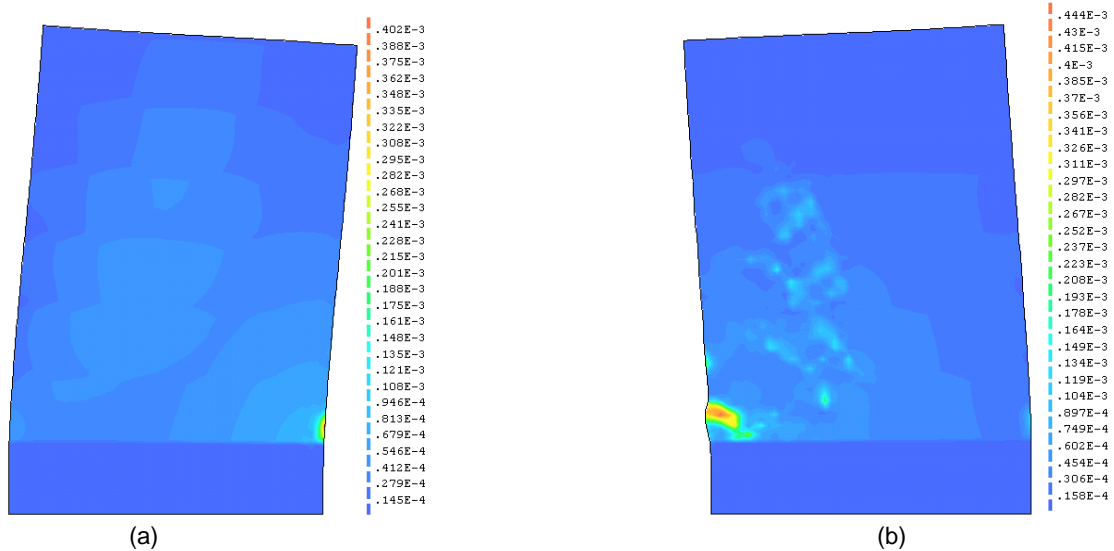


Slika 9. Vremenski tok pomjeranja kontrolnog čvora 44014  
Figure 9. Time history of displacement of the control node 44014

U slijedećim paragrafima, razvoj oštećenja i In the following paragraphs, the damage develop-

degradacija krutosti za zid Z-Y6 (vidjeti također sliku 5) biti će prodiskutirani. Prvi „vrh“ je evidentiran u vremenu  $t_1 = 3,29$  s, a vid oštećenja prikazan je na slici 10. Formiranje prve naprsline smješteno je na mjestu veze podruma koji je izgrađen od armiranog betona i prizemlja koje je izgrađeno od zidanih elemenata. Ista slika oštećenje može se vidjeti u vremenu  $t_2 = 3,41$  s samo na suprotnoj strani zida (slika 10 a) i b)).

ment and stiffness degradation of the wall W-Y6 (see also Figure 5) will be discussed. The first peak is evident at  $t_1 = 3.29$  s and the damage pattern is shown in Figure 10. The formation of the first cracks is located at the contact between the basement, made of reinforced concrete, and ground floor, made of masonry. The same pattern is kept at the time  $t_2 = 3.41$  s just in the opposite side of the wall (Figure 10a) and b)).



Slika 10. Glavne relativne dilatacije zatezanja za nosivi zid Z-Y6 (a)  $[(t)]_5 = 23,85$  s i (b)  $[(t)]_2 = 3,41$  s  
 Figure 10. Principal tensile strains in load bearing wall W-Y6 (a)  $[(t)]_5 = 23.85$  s i (b)  $[(t)]_2 = 3.41$  s

Drugi par „vrhova“ jeste u vremenu ( $t_3 = 7,65$  s) i ( $t_3 = 7,79$  s) u dva suprotna smjera. Razvoj naprslina prikazan je na slici 11 (a) i (b) respektivno. Konačno, slika oštećenja nakon prestanka djelovanja zemljotresa, dakle, u vrijeme  $t_5 = 23,87$  s prikazana je na slici 12. Koncentracija oštećenja smještena je na mjestu otvora, kao i na mjestu prizemlja i prvog sprata. Formiranje tipične „X“ naprsline – koja je karakteristična za ponašanje zidane konstrukcije na djelovanje poprečne sile – prikazana je na slici 12.

The second sets of peaks are and ( $t_3 = 7.79$  s) in the two opposite direction. The crack development is shown in Figure 11(a) and (b) respectively. Finally, the damage pattern on the structure after the earthquake, meaning at the time  $t_5 = 23.87$  s is shown in Figure 12. The concentration of damage is located at the openings as well as in the ground level and the first floor. The creation of the typical "X" cracks for shear behaviour is evident in Figure 12.

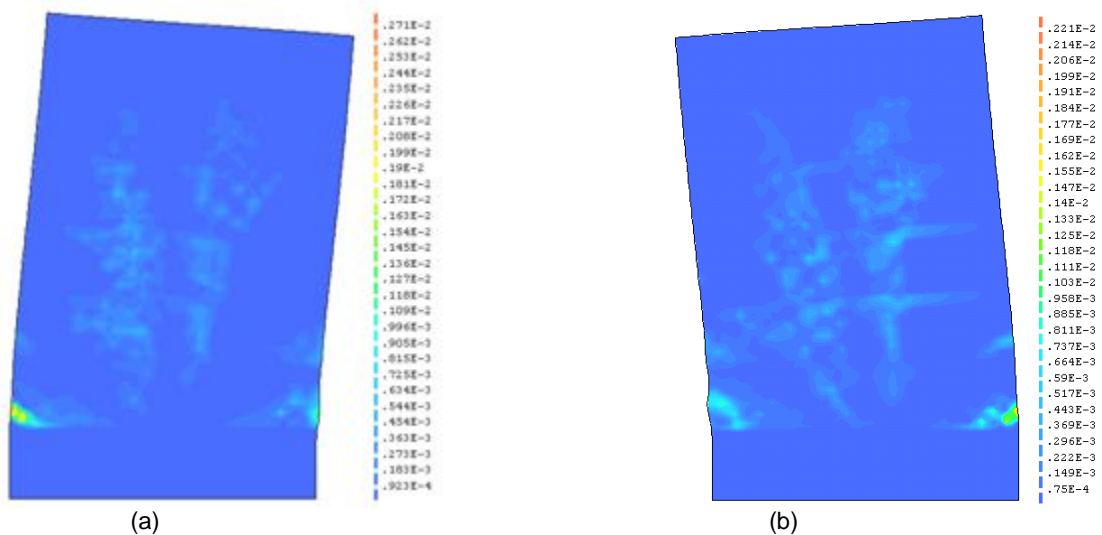


Figure 11. Glavne relativne dilatacije zatezanja za nosivi zid Z-Y6 (a)  $[(t)]_3 = 7,65$  s i (b)  $[(t)]_2 = 7,79$  s  
 Figure 11. Principal tensile strains in load bearing wall W-Y6 (a)  $[(t)]_3 = 7.65$  s i (b)  $[(t)]_2 = 7.79$  s

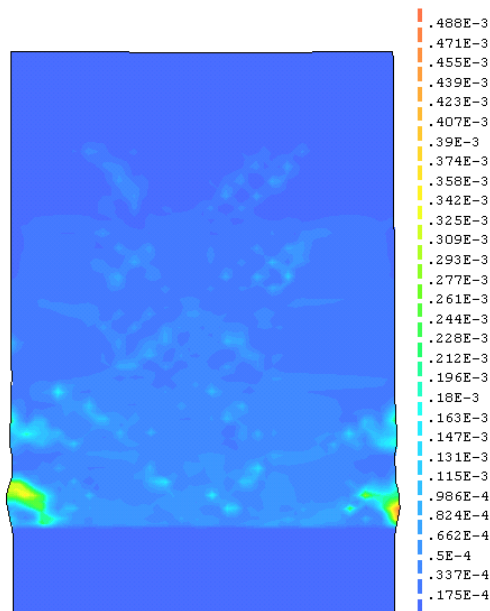


Figure 12. Glavne relativne dilatacije zatezanja za nosivi zid - Z-Y6 [(t)]<sub>5</sub> = 23,85 s  
 Figure 12. Principal tensile strains in load bearing walls W-Y6 [(t)]<sub>5</sub> = 23.85 s

## 5 DEGRADACIJA KRUTOSTI I DISIPACIJA ENERGIJE

Određivanje ili bolje rečeno, procjenjivanje tačne krutosti veoma je važno, na primjer, za projektovanje zidanih konstrukcija na osnovu metode proračuna, koja se zasniva na deformacijama [12, 17]. Histerezna kriva – petlja može se koristiti za procjenu deformacionog kapaciteta zidova. Obično se modul elastičnosti (Young-ov modul elastičnosti) i modul smicanja određuju iz važećih standarda, a ne putem eksperimentalnih ispitivanja. Uobičajeno je da se karakteristična čvrstoća na pritisak – određena putem eksperimenata – koristi kao osnova za izračunavanje drugih mehaničkih karakteristika zidova. Ova vrijednost ne predstavlja stvarno naponsko stanje u zidanim zidovima koji su podvrgnuti cikličnom poprečnom opterećenju [12].

### 5.1 Degradacija krutosti

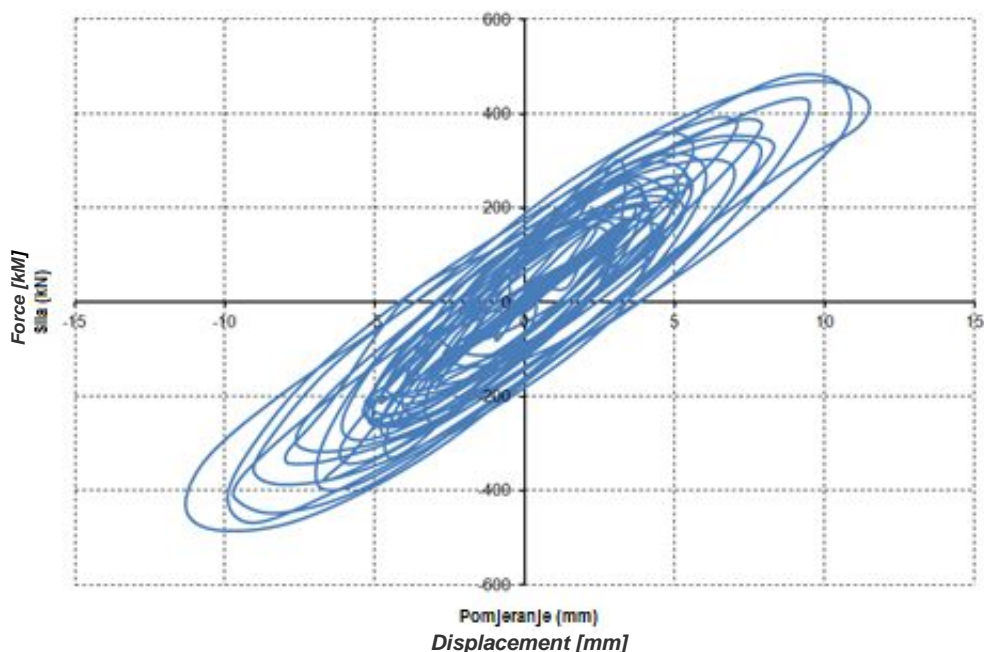
Krutost zida na poprečnu silu procenjuje se iz krive histereze prikazane na slici 13. Razmjera (visine naspram dužine) zida iznosi 1,50. Maksimalna otpornost definisana je vrijednostima:  $H_{max}$  dobijen iz proračuna iznosi 474,88 kN i  $d_{Hmax} = 8,53$  mm. Maksimalno pomeranje pri ultimnoj nosivosti iznosi  $d_{max} = 11,38$  mm, a odgovarajuća vrijednost  $H_u$  jeste 430,73 kN.

## 5 STIFFNESS DEGRADATION AND ENERGY DISSIPATION

Determining, or rather estimating the correct stiffness is of the utmost importance, for example for the deformation-based design of masonry structures [12, 17]. It is the hysteresis curve that can be used for the estimation of the deformation capacity of masonry. Usually the Young's and shear modulus is determined from the applicable codes and not through experimental tests. It is commonly the characteristic compressive strength that is determined from experiments and then used as the basis for calculation of other mechanical characteristics of masonry. This value does not represent the actual stress state in the masonry wall subjected to cyclic shear loading [12].

### 5.1 Stiffness degradation

The shear wall stiffness is assessed from the hysteresis curve shown in Figure 13. The aspect ratio (height over length) of the wall is 1.50. Maximal resistance is defined with values:  $H_{max}$  obtained from the calculations is 474.88kN and  $d_{Hmax}=8.53$ mm. Maximal displacement at the ultimate resistance amounts to  $d_{max} = 11.38$ mm and the corresponding  $H_u$  amounts to 430.73kN.



Slika 13. Histerezisna kriva – veza između horizontalnog pomjeranja na krovu (kontrolni čvor) 44014 i seizmičke

Figure 13. Hysteresis curve of the relationship between the horizontal displacement at the top floor (Control Node 44014) and the seismic force in the  $\pm Y$  direction

Kao što se može videti, degradacija krutosti kao indikator oštećenja, javlja se prilikom režima smanjivanja smicanja zbog obrnutih cikličnih opterećenja. Horizontalna opterećenja raspoređena su u skladu s krutostima zidova i to se vidi prenosom broja pukotina iz jednog zida na drugi zid. Kako se pukotine pojavljuju na jednom zidu, prenos opterećenja se mijenja jer se dobija drugačija distribucija u odnosu na preostalu krutost zida [1, 20].

Da bi se procenila degradacija zida, potrebno je izračunati sekantnu krutost ( $K_{s,i}$ ) za svaki ciklus. Ova vrijednost izračunata je prema sledećoj formuli:

$$K_{s,i} = \frac{H_{max,i}}{d_{max,i}} \quad (2)$$

gdje je:

$K_{s,i}$  – sekantna krutost za  $i$  ciklus

$H_{max,i}$  – horizontalna sila pri maksimalnom pomaku za  $i$  ciklus

$d_{max,i}$  – maksimalni pomak za  $i$  ciklus

Degradacija krutosti jasno je vidljiva na slici 14.. Kako se pomjeranje povećava, smanjuje se sekantna krutost zida, što dovodi do jasnog zaključka o oštećenju zida i njenom smanjenom kapacitetu. Rezultati [19, 21] ukazuju na to da je oblik degradacije krutosti – kao funkcije bočnog pomeranja u nedimenzionalnom obliku – prilično sličnog oblika, bez obzira na tip zidova (obični, omeđeni ili armirani).

As it can be seen the stiffness degradation as a damage indicator occurs at shear failure modes due to reverse cyclic loads. The horizontal loads are distributed according to the stiffness of the walls and this is seen by the transmission of the number of cracks from one wall to the other. As the cracks occur on one wall, the transfer of the load changes as different distribution is obtained in respect to the residual wall stiffness [1,20].

In order to evaluate the degradation of the wall it was necessary to calculate the secant stiffness ( $K_{s,i}$ ) for each cycle. This value was calculated according to the formula:

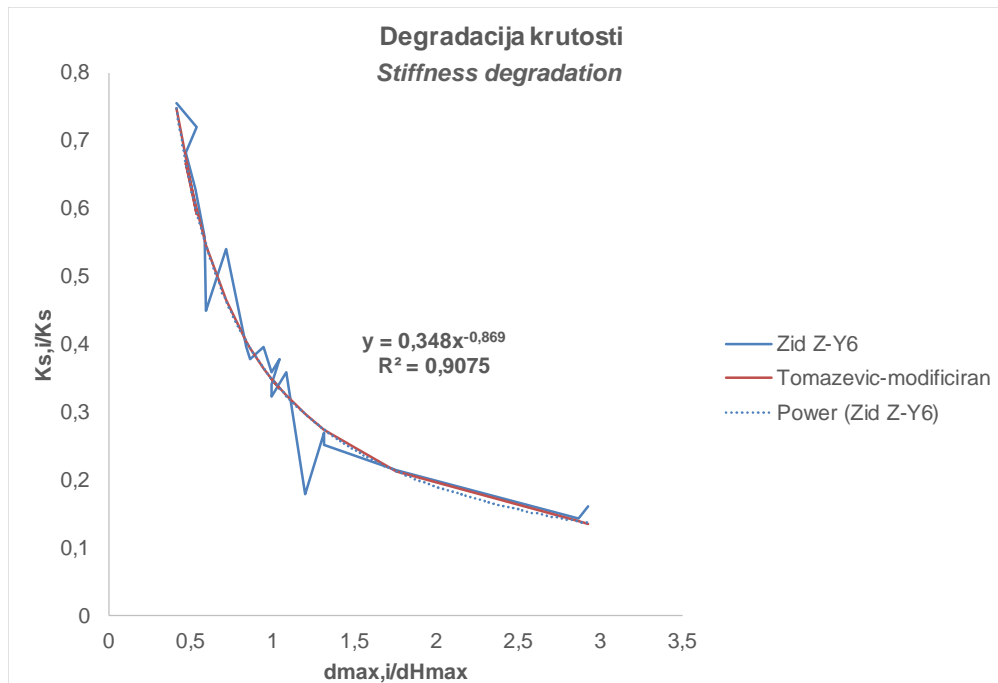
where:

$K_{s,i}$  – secant stiffness as  $i$  cycle

$H_{max,i}$  – horizontal load at maximum displacement at  $i$  cycle

$d_{max,i}$  – maximum displacement at  $i$  cycle

Degradation of the stiffness is clearly seen in Figure 14. As the displacement increases the secant stiffness of the wall decreases leading to the clear conclusion regarding the damage of the wall and its reduced capacity. The results [19, 21] indicated that the shape of the stiffness degradation as a function of lateral displacement in the non-dimensional form is of a rather similar form regardless of the masonry type (plain, confined or reinforced masonry).



Slika 14. Degradacija krutosti  
Figure 14. Stiffness degradation

Tomažević i Klemenc [19, 21] predložili su stepenu funkciju koja se može koristiti za degradaciju krutosti zidanih zidova podvrgnutih cikličnim opterećenjima u ravni. Ova funkcija glasi:

$$\frac{K_{s,i}}{K_s} = \alpha_1 \left( \frac{d_{max,i}}{d_{Hmax}} \right)^\beta \quad (3)$$

gdje je :

$K_s$  – sekantna krutost pri elastičnom stanju

$d_{Hmax}$  – pomak pri maksimalnoj horizontalnoj sili

$\alpha_1, \beta$  – parametri degradacije krutosti

U odsustvu eksperimentalnih podataka, predloženo

je da se koristi vrijednost  $\alpha_1 = 0,3$ , i  $\beta = -0,85$  za slučaj normalnih napona pritiska, koji ne prelaze 20% čvrstoće na pritisak zidanog zida i cikličnih bočnih opterećenja [6, 22]. U ovom slučaju, parametri  $\alpha_1, \beta$  dobijeni su regresionom analizom izračunate krive i dobijene vrijednosti jesu  $\alpha_1 = 0,348$ , i  $\beta = -0,869$ . Dobijeni koeficijent određivanja ili koeficijent višestruke determinacije za višestruku regresiju jeste jednak –  $R^2=0,91$ . Predložena stepena funkcija na dobar način prati trend degradacije krutosti.

## 5.2 Disipacija energije

Drugi, prilično važan parametar u analizi cikličnih odgovora konstrukcija jeste koeficijent disipacije energije zidova. Ovakav kapacitet procjenjuje se putem koeficijenta ekvivalentnog viskoznog prigušenja ( $\zeta_{eq}$ ),

Tomažević and Klemenc [19,21] have proposed a power function which can be used for the stiffness degradation of the masonry walls subjected to in-plane cyclic loads. This power function reads:

where:

$K_s$  – secant stiffness at elastic limit

$d_{Hmax}$  – displacement at maximum horizontal load

$\alpha_1, \beta$  – stiffness degradation parameters

In the absence of experimental data it was suggested to use the value of  $\alpha_1 = 0,3$ , and  $\beta = -0,85$  for the case of normal compression stresses, not exceeding 20% of masonry's compressive strength, and cyclic lateral loads [6, 22]. In this case the parameters  $\alpha_1, \beta$  were obtained by the regression analysis of the calculated curve resulting in  $\alpha_1 = 0,348$ , and  $\beta = -0,869$ . The obtained coefficient of determination, or the coefficient of multiple determination for multiple regression is equal to  $R^2=0,91$  and the proposed power function follows the trend of stiffness degradation in a good manner.

## 5.2 Energy dissipation

Another rather important parameter in the cyclic response analysis of structures is the energy dissipation coefficient of the walls. This capacity is evaluated through the coefficient of equivalent viscous damping

koji se dobija kada se disipirana energija u vibracionom ciklusu stvarne konstrukcije odredi da bude jednaka ekvivalentnom viskoznom sistemu [6]. Indikatori oštećenja koji uzimaju u obzir disipaciju energije koji se odražavaju u čvrstoći i krutosti mogu se uspješno koristiti za kontrolu parametara prilikom proračuna [16].

Da bi se približno odredilo ekvivalentno viskozno prigušenje povezano s histerektičkim ponašanjem, može se koristiti koncept disipirane ( $E_D$ ) i uskladištene ( $E_{SO}$ ) energije. Disipirana energija u zidu data je površinom  $E_D$  zatvorene petlje histereze u jednom ciklusu opterećenja.

Energija disipirana viskoznim prigušenjem u jednom ciklusu harmonijskih vibracija, kako je definisano u [9], data je jednačinom (4)

$$E_D = 2\pi\zeta \frac{\omega}{\omega_n} k u_0^2 \quad (4)$$

gdje je:

- $\omega$  – frekvencija pobude
  - $\omega_n$  – sopstvena frekvencija
  - $\zeta$  – koeficijent prigušenja
  - $k$  – krutost
  - $u_0$  – amplituda pomjeranja u *steady state*
- Potencijalna energija se definiše jednačinom (5)

$$E_{SO} = \frac{k u_0^2}{2} \quad (5)$$

Izjednačavanje energije disipirane viskoznim prigušenjem u jednom ciklusu harmoničnih vibracija definisanih u (4), sa energijom koja se disipira u stvarnoj konstrukciji, dovodi do:

$$E_D = 4\pi\zeta_{eq} \frac{\omega}{\omega_n} E_{SO} \quad \text{ili / or} \quad \zeta_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{1}{\omega} \frac{E_D}{E_{SO}} \quad (6)$$

Određivanje  $E_D$  treba izvršiti kada je  $\omega = \omega_n$ , pošto je odgovor sistema najosjetljiviji na prigušenje. Ovo, konačno, vodi do sledećeg:

$$\zeta_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_{SO}} \quad (7)$$

Grafički prikaz odgovarajućih energija dat je na slici 15.

Izračunate su vrijednosti pohranjene potencijalne energije i disipirane energije, kao što je objašnjeno u prethodnom tekstu za ovaj konkretan slučaj (prikazano na slici 16). Sličan trend disipacije energije dobijen je u [7], što je uporedivo s obzirom na to što su karakteristike ulaznih podataka – u vezi s karakteristikama materijala zidane konstrukcije – prilično slične [1, 2, 7]. Odnos između disipirane i ulazne energije kreće se u opsegu od 14% do 49%.

( $\zeta_{eq}$ ), which is obtained when the energy dissipated in a vibration cycle of the actual structure is set to be equal to the equivalent viscous system [6]. Damage indicators that consider the energy dissipation reflected in the strength and stiffness deterioration can be used successfully to control the design parameters [16].

In order to make an approximation of the equivalent viscous damping connected to the hysteretic behaviour, the concept of dissipated ( $E_D$ ) and stored ( $E_{SO}$ ) energy can be utilized. The dissipated energy in the wall is given by the area  $E_D$  enclosed by the hysteresis loop in one cycle loading.

The energy dissipated by viscous damping in one cycle of harmonic vibrations, as defined in [9], is given by equation (4)

where:

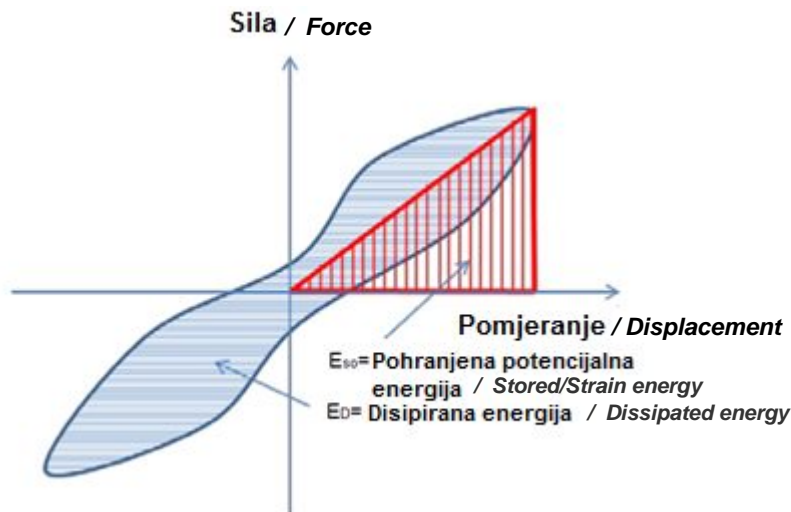
- $\omega$  - exciting frequency
  - $\omega_n$  - natural frequency
  - $\zeta$  - damping ratio
  - $k$  - stiffness
  - $u_0$  - steady state displacement amplitude
- The stored/strain energy is defined by equation (5)

Equating energy dissipated by viscous damping in one cycle of harmonic vibrations defined in (4) with the energy dissipated in the actual structure leads to:

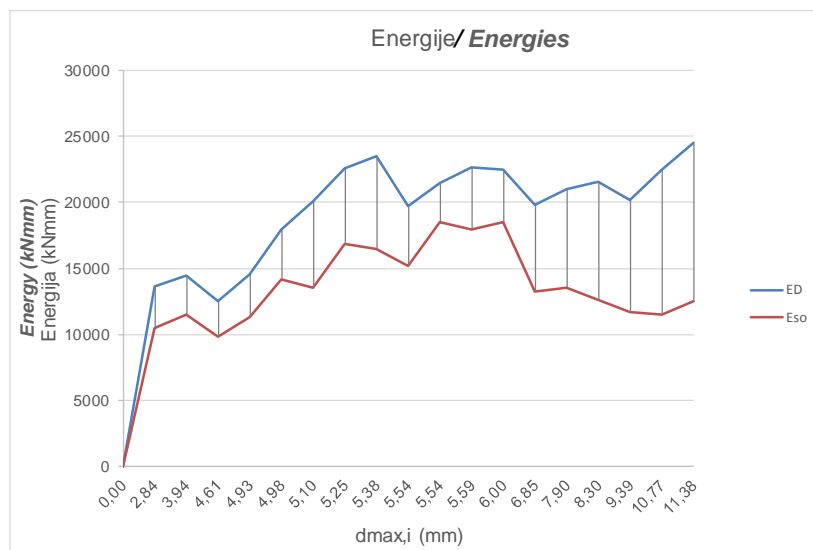
Determination of the  $E_D$  should be done when  $\omega = \omega_n$  as the response of the system is most sensitive to damping. This finally leads to

Graphical representation of the respective energies is illustrated in Figure 15.

The calculated values of the strain/stored potential energy and dissipated energy, as explained above for this particular case, is presented in the Figure 16. A similar trend of the energy dissipation was obtained in [7], which is comparable as the input material characteristics of the masonry structure are quite similar [1, 2, 7]. The ratio between dissipated and input energy was in the range from 14 to 49%.



Slika 15. Proračun disipirane i potencijalne energije  
Figure 15. Calculation of dissipated and stored energy



Slika 16. Disipirana i pohranjena potencijalna energija  
Figure 16. Dissipated and stored potential energy

Na osnovu dobijenih vrijednosti disipirane i pohranjene potencijalne energije i korišćenjem jednačine (7), prosječna vrijednost koeficijenta ekvivalentnog viskozno prigušenja ( $\zeta_{eq}$ ), s obzirom na to što je početno viskozno prigušenje ( $\zeta_0$ ) jednako nuli, što ukazuje na to da zavisi samo od histeričnog ponašanja, iznosi 11,48%.

Kada se govori o URM, ove veličine u funkciji su oblika loma, iz eksperimentalne i analitičke studije [10]. U istraživanju, Magenes i Calvi predložili su ultimni međuspratni pomak od 0,5% i 1,0%, a ekvivalentno prigušenje jednako je 10% i 15%, usljed otkazivanja na smicanje i savijanje respektivno. Priestley i ostali [15], u istraživanju koje je sprovedeno nekih deset godina nakon [10], smanjuje ove granice međuspratnog pomjeranja za 20%, tj. 0,4% za smicanje i 0,8% za lom

On the basis of obtained values of dissipated and stored potential energy and utilizing the equation (7), the average value of the coefficient of equivalent viscous damping ( $\zeta_{eq}$ ), taking into account that the initial viscous damping ( $\zeta_0$ ), is equal to zero, indicating that it is dependent only on the hysteretic behaviour, amounts to 11.48%.

Regarding URM, these quantities are indicated in function of the failure mode, from an experimental and analytical study [10]. In their research, Magenes and Calvi suggested an ultimate drift of 0.5% and 1.0%, and an equivalent damping equal to 10% and 15%, for shear and flexural failure respectively. Priestley et al. [15], in a research carried out some 10 years later than [10], reduced these drift limits by 20%, i.e. 0.4% for shear and 0.8% for flexural failure. These are also the limits



usljed savijanja. Ovo predstavljaju i granice koje se nalaze u italijanskim tehničkim propisima. Dakle, sada se pretpostavlja da ekvivalentno viskozno prigušenje iznosi 15% za ponašanje na smicanje i 10% za ponašanje na savijanje. Dobra usaglašenost dobijena je vrijednostima koje su predložene u [10, 15].

## 6 ZAKLJUČAK

U predstavljenom radu, prikazano je seizmičko ponašanje tipične zidane konstrukcije na području Zapadnog Balkana, pod djelovanjem cikličnog opterećenja. Čini se da je njeno seizmičko ponašanje kontrolisano osnovnim oblicima ponašanja.

S povećanjem pomaka, koncentracija oštećenja smještena je kod otvora, kao i na mjestu prizemlja i prvog sprata. Zidovi koji su paralelni s djelovanjem opterećenja prikazuju dijagonalne naprsline uzrokovane djelovanjem horizontalnih sila, kao i dijagonalni vid pukotina u obliku slova „X”, usljed djelovanja cikličnog opterećenja, što vodi smanjenju kapaciteta.

Na osnovu proračuna, potvrđeno je to da i za ovaj objekat oblik degradacije krutosti prati trend stepene funkcije. Dobijena vrijednost koeficijenta ekvivalentnog viskoznog dampinga  $\zeta_{eq}$  jednaka je 11,5%, što je u skladu s prijedlozima drugih istraživača. Istraživanja potvrđuju to da uticaji čvrstoće pri cikličnom opterećenju u ravni i degradacija krutosti jesu krucijalne prilikom određivanja moguće lateralne dinamičke nestabilnosti. Ovdje pokazatelji oštećenosti uzimaju u obzir disipaciju energije što se ogleda u pogoršanju čvrstoće i krutosti te predstavlja jasan pokazatelj ponašanja obične (URM) zidane konstrukcije.

## 7 LITERATURA REFERENCES

- [1] Ademović, N. Behavior of Masonry Structures in Bosnia and Herzegovina at the Effect of Earthquakes from the Viewpoint of Modern Theoretical and Experimental Knowledge, PhD Thesis, Faculty of Civil Engineering, University of Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2012
- [2] Ademović, N. Structural and seismic behavior of typical masonry buildings from Bosnia and Herzegovina. MSc thesis. University of Minho. 2011.
- [3] Ademović N, Oliveira, D.V. (2012). Seismic Assessment of a Typical Masonry Residential Building in Bosnia and Herzegovina, Proceedings of the 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal. pp.1–10
- [4] Ademović, N., Hrasnica, M., Oliveira, D.V. (2013). Pushover analysis and failure pattern of a typical masonry residential building in Bosnia and Herzegovina, Engineering Structures, Vol. 50, pp.13–29
- [5] Anderson, D.L., Brzev, S. (2009). Seismic Design Guide for Masonry Buildings. Canadian Concrete Masonry Producers Association Toronto, Ontario, 317 pp ([www.ccmipa.ca](http://www.ccmipa.ca))
- [6] Chopra, A. K. Dynamics of Structures. New Jersey. Pearson Prentice Hall, 2007.
- [7] Churilov, S., Dumova-Jovanoska, E. (2013) In-plane shear behaviour of unreinforced and jacketed brick masonry walls, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume 50, July 2013, pp 85–105
- [8] DIANA 9.4 TNO DIplacement method ANALyser 9.4, Finite element analysis. User's Manual, release 9.4., Netherlands, 2009. Vol. Release 9.4.
- [9] Flores, L.E., Alcocer, S.M. (1996). Calculated Response of Confined Masonry Structures. 11<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering. Elsevier Science Ltd., Paper no. 1830, pp. 1–8
- [10] Magenes, G., Calvi, G. M. (1997). In-plane seismic response of brick masonry walls. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 26(11), pp.1091-1112.
- [11] Mendes, N., Lourenco, P. B. (2010). Seismic Assessment of Masonry „Gaioleiro” Buildings in Lisbon, Portugal. Journal of Earthquake Engineering, 14:80–101, pp. 80–101

imposed by Italian Technical Code. So, now the equivalent viscous damping is assumed to be 15% for shear and 10% for flexural failure behaviour. A good consistency is obtained with the values proposed in [10, 15].

## 6 CONCLUSION

In the presented paper, the seismic behaviour of a masonry building typical from Western Balkans under cyclic loading is presented and exploited. Its seismic behaviour seems to be controlled by the fundamental global modes.

With the increase of displacement, the concentration of damage is located at the openings as well as in the ground level and the first floor. The walls parallel to the load direction exhibit diagonal cracking caused by horizontal forces, as well as the diagonal "X" type cracking due to cyclic loading, leading to its reduced capacity.

From the calculations, it was confirmed that also for this building the stiffness degradation shape follows a power function trend. The obtained value of the coefficient of equivalent viscous damping  $\zeta_{eq}$  amounts to 11.5%, which agrees with the proposals given by other researchers. Investigations confirm that the effects of in-plane cyclic strength and stiffness degradation are crucial in determining the possibility of lateral dynamic instability. Here damage indicators take into account energy dissipation which is reflected in the strength and stiffness deterioration giving a clear indication of the behavior URM building.

- [12] Mojsilović N., (2014). Assessment of the unreinforced masonry shear wall stiffness, Proceedings International Conference on Construction Materials and Structures, Johannesburg, South Africa, November 24–26, 2014. pp. 1157–1163.
- [13] Morante, R.J. (2006). Recommendations for Revision of Seismic Damping Values in Regulatory Guide 16.1 Washington. US Nuclear Regulatory Commission
- [14] Petrovski, T.J. (2003). Damaging Effects of July 26, 1963 Skopje Earthquake [Conference] // International Conference 40 years 1963 Skopje Earthquake. - Skopje : European Earthquake Engineering (SE-40EEE)
- [15] Priestley, M. J. N., Calvi, G. M. Kowalsky, M. J. Displacement Based Seismic Design of Structures: Pavia, Italy., IUSS Press, 1st edition, 2007
- [16] Reinhorn, A.M., Kunnat, J.B., Mander, J.B. Nonlinear Seismic Analysis and Design of Reinforced Concrete Buildings. Edited: P.Fajfar, H.Krawinkler, Taylor & Francis, pp.63-76, 2005
- [17] Salmanpour, A.H., Mojsilović, N., Schwartz, J. (2013). Deformation capacity of unreinforced masonry walls subjected to in plane loading: a state-of-the-art review, Journal of Advanced Structural Engineering 5:22, pp.1–12
- [18] Seismosignal Earthquake Engineering Software Solutions, Version 4.2.1., 2010.
- [19] Tomažević, M., Klemenc, I. (1997). Verification of Seismic Resistance of Confined Masonry Buildings, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, pp. 1073–1088, Vol. 26.
- [20] Tomažević, M. Repair and Strengthening. [http://www.know2do.org/Retrofit/BrickMasonry/RS\\_BrickMasonryP.htm](http://www.know2do.org/Retrofit/BrickMasonry/RS_BrickMasonryP.htm)
- [21] Tomažević, M. Earthquake-resistant design of masonry building. London. Imperial College Press, 1999.- Vol. I.
- [22] Tomažević, M., Lutman, M. Petković L., (1996). Seismic behavior of masonry walls: experimental simulation. Journal of Structural Engineering, 122 (9) (ASCE, New York, 1996), pp. 1040–1047

## REZIME

### INDIKATORI OŠTEĆENJA OBIČNIH NEARMIRANIH ZIDANIH ZIDOVA IZLOŽENI SEIZMIČKIM DJELOVANJIMA

*Naida ADEMOVIĆ  
Daniel V. OLIVEIRA*

Disipacija energije i degradacija krutosti su važni seizmički indikatori i degradacije ponašanja unutar numeričkog modeliranja konstrukcija, a u ovom slučaju zidane konstrukcije. Oni su veoma značajni za procjenu seizmičkog učinka zidanih zidova. U ovom članku analiziran je primjer postojeće zidane stambene zgrade koja se nalazi u Sarajevu, u Bosni i Hercegovini. Uočena je očigledna degradacija krutosti zidanih zidova prilikom odgovora zgrade na horizontalna djelovanja.

**Ključne riječi:** zidane konstrukcije, degradacija krutosti, nelinearno modeliranje, raspodjela oštećenja, disipacija energije, indikatori oštećenja, seizmička djelovanja

## SUMMARY

### DAMAGE INDICATORS FOR UNREINFORCED MASONRY BUILDING WALLS SUBJECTED TO SEISMIC ACTIONS

*Naida ADEMOVIC  
Daniel V. OLIVEIRA*

Energy dissipation and stiffness degradation are important seismic performance indicators within the numerical modelling of structures, and in this case particularly of masonry. They are of great importance for evaluation of the seismic performance of masonry walls. An example of an existing masonry residential building located in Sarajevo, Bosnia and Herzegovina was investigated in this paper. It was observed that during the response of the building to horizontal actions the stiffness degradation of masonry walls was evident.

**Key words:** masonry structures, stiffness degradation, nonlinear modelling, damage pattern, energy dissipation, damage indicators, seismic actions

# OCENA I POBOLJŠANJE ODRŽAVANJA GRADSKIH ULICA: STUDIJA SLUČAJA Kragujevac

## ASSESSMENT AND IMPROVEMENT OF URBAN STREETS MAINTENANCE: CASE STUDY Kragujevac

Igor JOKANOVIĆ

PRETHODNO SAOPŠTENJE  
PRELIMINARY REPORT  
UDK: 625.712.08(497.11)  
doi:10.5937/GRMK1704033J

### 1 UVOD

Agencije za puteve godinama su se suočavale s raznim problemima prilikom održavanja putnih infrastrukturnih sistema u ispravnom stanju, korišćenjem tradicionalnih metoda ugovaranja. Kao rešenje ovih problema, mnoge od njih su počele da zaključuju ugovore o radovima na održavanju puteva s privatnim sektorom, na osnovu merenja učinka [1–4]. Osnova za ovakav ugovor jeste konkretan opis željenog proizvoda, pri čemu investitor plaća izvođaču odgovarajuću naknadu za obezbeđivanje proizvoda koji zadovoljava postavljene standarde. Ne obavlja se merenje stvarnih radova koje obavi izvođač, i investitora ne zanima šta izvođač radi, već samo da li konkretan proizvod ima odgovarajuće karakteristike kada su u pitanju funkcionalnost i kvalitet. Ova metoda ugovaranja zove se ugovaranje održavanja na osnovu učinka (eng. *Performance Based Maintenance [PBM]*). Ova metoda smatra se isplativijom od drugih, tradicionalnih metoda ugovaranja i poseduje značajnu istoriju uspešnih pokušaja u mnogim razvijenim zemljama i zemljama u razvoju u poslednje dve decenije [1–5].

Tradicionalne metode ugovora o održavanju puteva zavise od količine obavljenih radova i agencija za puteve plaća izvođača na osnovu prethodno dogovorenih jediničnih cena. S druge strane, PBM ugovori (PBMC) za putne infrastrukturne sisteme zasnivaju se na rezultatima rada izvođača i plaćanje se vrši na osnovu mogućnosti izvođača da dostigne standard učinka – definisan ugovorom, a ne na osnovu količine izvršenih

### 1 INTRODUCTION

For years, road authorities faced with number of problems when using traditional contracting methods for maintenance of serviceability of road infrastructure systems. As a solution to these problems, many of them started contracting out road maintenance works to the private sector, based on a measured performance [1-4]. Basically, the contract provides the specific description of the required product whereby the employer pays the contractor adequate compensation for providing the product that complies with the required standards. The actual work done by the contractor is not measured, and the employer is not concerned with contractor's work procedures - only with the specific functional and quality characteristics of the delivered product.. This contracting method is known as Performance Based Maintenance (PBM) contracting. It is considered to be more cost effective than the other traditional methods of contracting. It had a substantial success records in many developed and developing countries over the last two decades [1-5].

Traditional methods of road maintenance contracts depend on the amount of work executed and contractors are paid by the road authority based on the previously agreed unit rates. On the other hand, PBM Contracts (PBMCs) for road infrastructure systems are based on the outcome of contractors' work and payments are made subject to contractors' ability to achieve the performance level defined in the contract, and not on the quantity of works executed. PBMCs define final product

Prof. dr Igor Jokanović, dipl.građ.inž., Univerzitet u Novom Sadu, Građevinski fakultet Subotica  
Kozaračka 2a, 24000 Subotica,  
imejl: [jokanovic@gf.uns.ac.rs](mailto:jokanovic@gf.uns.ac.rs)

Prof. Igor Jokanović, Ph.D., Civil Eng., University of Novi Sad, Faculty of Civil Engineering Subotica,  
2a Kozaračka Str., 24000 Subotica, Serbia  
e-mail: [jokanovici@gf.uns.ac.rs](mailto:jokanovici@gf.uns.ac.rs)

radova. PBMC definiše krajnji proizvod, a od izvođača zavisi kako će to da postigne. Stoga, izbor radova, projektovanje i realizacija u potpunosti su njegova odgovornost. Tako, izbor i primena tehnologije i upotreba inovativnih materijala, procesa i upravljanja u potpunosti zavise od izvođača. Na taj način, gotovo kompletan rizik prelazi na izvođača, u poređenju s tradicionalnim ugovornim odnosima, ali – istovremeno – otvara mogućnosti za povećanje marže, pri čemu poboljšanje efikasnosti i efektivnosti projekta, procesa, tehnologije ili upravljanja mogu da smanje troškove ispunjavanja standarda učinka [1].

Iako je PBM koncept u širokoj upotrebi u praksi održavanja puteva, znatno je manje iskustvo u primeni ovog koncepta na gradske ulice u nadležnosti lokalnih vlasti. Republika Srbija (RS) ima pozitivno iskustvo s PBMC-ovima [5], međutim, samo za državne puteve na bazi pilot-projekata, između 2004. i 2008. godine. U poslednje vreme, ovo je rezultiralo pokretanjem PBMC nabavke za oko 3.000 km mreže državnih puteva u istočnoj Srbiji. Na nivou mreže lokalnih puteva ne postoje iskustva u primeni PBMC.

S ciljem da se unaprede sadašnja praksa i uslovi gradske mreže, sprovedena je studija [6] posebno u vezi sa ugovorima na osnovu učinka (eng. *Performance Based Contracts [PCB]*) za održavanje mreže puteva na teritoriji grada Kragujevca, koja je obuhvatila pravnu i tehničku ocenu, ispitivanje tržišta i potrebne kapacitete.

## 2 TRENUTNI USLOVI I PRAKSA U KRAGUJEVCU

Kragujevac [7] je četvrti grad po veličini u Srbiji, s populacijom od oko 180.500 stanovnika i projektovanom gradskom aglomeracijom do 220.000 stanovnika do 2020. godine. Gradska populacija broji oko 153.500 stanovnika, a seoska oko 27.000. Grad se nalazi na 140 km južno od prestonice Srbije – Beograda – i povezan je s njim auto-putom na Panevropskom koridoru X.

Sastoji se od pet opština s 57 naselja i 76 lokalnih zajednica. Ova prestonica Srbije iz XIX veka (1818–1841) bila je značajan industrijski i trgovinski centar zemlje, a danas je administrativni centar šumadijskog okruga. Kragujevac je jedan od srpskih univerzitetskih centara. Univerzitet u Kragujevcu osnovan je 1976. godine i sastoji se od jedanaest fakulteta koji imaju veoma aktivne naučne i istraživačke delatnosti.

Tokom XIX veka, mnoge visoke državne institucije – pravosudne, obrazovne, kulturne, industrijske, apotekarske – osnovane su upravo u ovom gradu (sud, nacionalna kancelarija, osnovna škola, licej, Srpski kraljevski orkestar, Dvorsko pozorište, Topolivnica, elektrana, apoteka). U to vreme, postavljeni su temelji modernog gradskog života. U XX veku grad je pretrpeo ogromno razaranje i žrtve tokom I i II svetskog rata, ali sledi demografski i industrijski rast. Danas, Kragujevac je najpoznatiji po automobilskoj i vojnoj industriji, ali i ove oblasti suočavaju se s teškim ekonomskim uslovima i nedostatkom tržišta.

and it is up to the contractor how to achieve this. Therefore, selection of work method, design and delivery are entirely contractor's responsibility. Hence, the selection and application of technology and the pursuit of innovative materials, processes and management is entirely up to the contractor. This allocates almost complete risk to the contractor unlike the traditional contract arrangements, but at the same time opens up the opportunities for the contractor to increase his margins, where improved efficiencies and effectiveness of design, process, technology or management can significantly reduce the cost of achieving the specified performance standards [1].

Even though the PBM concept has been widely used in the road maintenance practice, there is a significantly lower experience with applying this concept to urban streets under the jurisdiction of local authorities. Republic of Serbia (RS) has a positive experience with the PBMCs [5], but only for state roads on a pilot basis between 2004 and 2008. Lately, this resulted in launching the PBMC procurement for approximately 3,000 km of state roads network in Eastern Serbia. There has been no experience of PBMC implementation at the level of local roads network yet.

With the goal to improve the current practice and condition of urban network, the study [6] specifically related to the use of Performance Based Contracts (PBCs) for maintenance of the City of Kragujevac road network has been conducted, covering legal and technical assessment, market sounding and capacity needs.

## 2 CURRENT CONDITIONS AND PRACTICE IN KRAGUJEVAC

Kragujevac [7] is the fourth largest city in Serbia, with population of approximately 180,500 individuals, and a projected future conurbation of up to 220,000 by 2020. The urban population accounts for about 153,500 individuals and the rural about 27,000. The City is situated 140 km to the south of Serbian capital - Belgrade and connects to the capital by Pan-European Corridor 10 highway.

It comprises of 5 municipalities with 57 settlements and 76 local communities. This 19<sup>th</sup> century capital of Serbia (1818-1841) was an important industrial and trading centre of the country, and it is today the administrative centre of Šumadija District. Kragujevac is one of the Serbian university centres. University of Kragujevac was established in 1976 and is comprised of 11 faculties that have vibrant scientific and research activities.

During the 19<sup>th</sup> century many first state institutions - judicial, educational, cultural, industrial and apothecary - were established here (Court, National Office, Grammar and High School Lyceum, Serbian Majestic Orchestra, Court Theatre, Cannon Foundry, Electric Power Plant, Pharmacy). At that time the foundations of the modern city life were laid. In the 20<sup>th</sup> century the city experienced fierce devastation and casualties during the First and Second World Wars, but demographical and industrial boost followed. Today Kragujevac is best known for its car and army industry, but these have also been struggling with fierce economic conditions and lack of market.

## 2.1 Mreža

Najnoviji planski dokument usvojen za grad Kragujevac (Strategija održivog razvoja grada Kragujevca u periodu 2013–2018 [8]) ukazuje na mrežu od oko 430 km, kao što je prikazano u Tabeli 1. Prema poslednjim podacima, opštinski putevi čine 70,7% ukupne kategorizovane putne mreže. Od toga, 82,6% ima modernu kolovoznu strukturu.

## 2.1 Network

The latest planning document adopted for the City of Kragujevac (Strategy of Sustainable Development of the City of Kragujevac 2013-2018 [8]) reports the network of approximately 430 km, as presented in Table 1. According to the latest data, municipal roads account for 70.7% of the total categorized road network. Out of this, 82.6% are with modern pavement structure.

Tabela 1. Dužina i tip kolovozne konstrukcije za kategorizovanu putnu mrežu grada Kragujevca [8]  
Table 1. Length and pavement type for categorized road network of the City of Kragujevac [8]

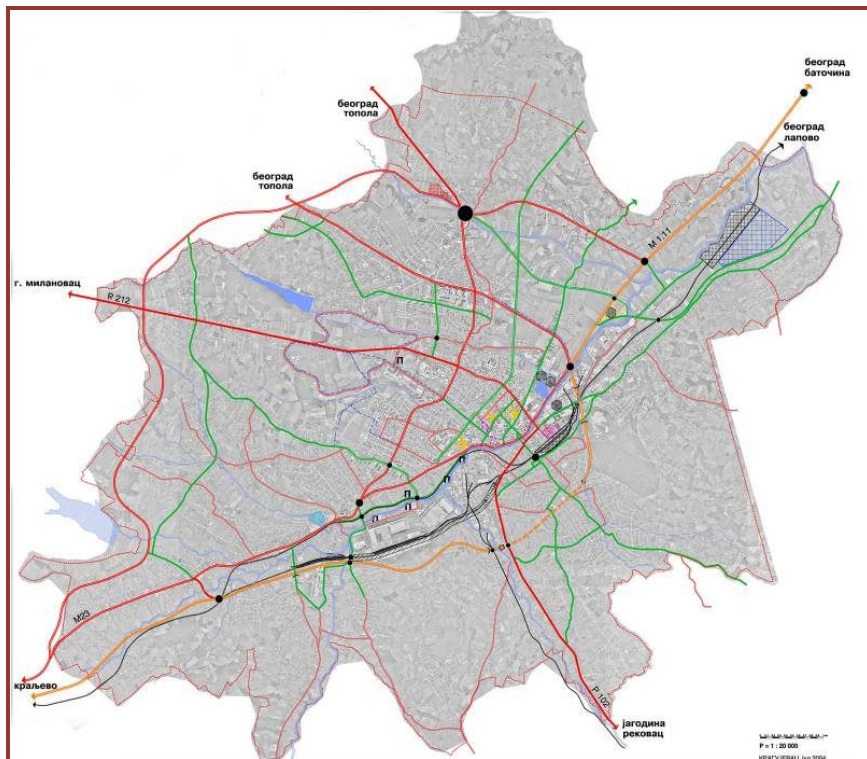
kategorija puta road category	dužina prema tipu kolovoza [km] length by pavement type [km]			ukupno / total	
	moderan modern	makadam/šljunak macadam/gravel	zemlja earth	km	%
državni put I kategorije I category state roads	74,0	0	0	74,0	17,2
državni put II kategorije II category state roads	52,0	0	0	52,0	12,1
lokalni putevi local roads	251,65	50,75	2,1	304,5	70,7
ukupno / total	377,65	50,75	2,1	430,5	100,0

Mreža ulica sastoji se u osnovi od radialne infrastrukture koja direktno usmerava državne puteve (I i II kategorije) ka gradu (slika 1). Prema funkcionalnoj klasifikaciji ulica, ovo su najviše rangirane ulice koje odgovaraju svom položaju u lokalnoj mreži ulica i saobraćajnom opterećenju koji nose. Mreža od sekundarnog i lokalnog značaja jeste generalno ortogonalnog tipa, orijentisana u pravcu severozapad-jugoistok i severoistok-jugozapad. Funkcionalne kategorije ulica prikazane su u tabeli 2. Ukupna dužina centralne mreže ulica jeste oko 62,8 km (arterijske i glavne ulice), dok je ukupna dužina mreže kategorizovanih ulica – 94,2 km. Ona se, dalje, uvećava mrežom lokalnih kategorizovanih puteva na približno 400 km. Takođe, postoji oko 1.000 km nekategorizovanih puteva, od kojih je 100 km s modernim kolovozom.

Street network basically consists of radial infrastructure that directly guides state roads (1st and 2nd category) to the City (Figure 1). According to the functional classification of streets, these are highest ranked streets that correspond to their position in the local network of streets and traffic loads they carry. The network of secondary and local importance is generally of orthogonal type with orientation in the northwest-southeast and northeast-southwest direction. Functional categories of streets are presented in Table 2. Total length of core street network is 62.8 km (arterial and main streets), while total length of categorized street network is 94.2 km. This is further enlarged by the network of local categorized roads to total approximately 400 km. There are also about 1,000 km of uncategorized roads, 100 km of which with modern pavement.

Tabela 2. Podela gradske mreže [9]  
Table 2. Division of street network [9]

kategorija ulica street category	dužina [km] length [km]	širina profila [m] profile width [m]
arterije arterial streets	34,9	10 - 25
glavne ulice main streets	27,9	9 - 22
sabirne ulice collector streets	31,4	9 - 22
ukupno / total	94,2	



Slika 1. Mreža saobraćajne infrastrukture  
Figure 1. Traffic infrastructure network [9]

## 2.2 Praksa upravljanja i održavanja

Gradske vlasti – koje imaju posebnu ulogu u upravljanju ulicama i putevima i nadzoru aktivnosti u okviru gradskog područja – jesu [10]:

- Gradska uprava za investicije;
- Gradska uprava za komunalne i inspeksijske poslove.

Gradska uprava za investicije vodi računa o svim putevima koji nisu pokriveni Generalnim urbanističkim planom (GUP), kao i o svim nekategorizovanim putevima u granicama GUP-a. S druge strane, Gradska uprava za komunalne i inspeksijske poslove nadležna je za kategorizovane lokalne puteve i ulice u granicama GUP-a. Radi realizacije svojih dužnosti upravljača, one potpisuju godišnje ugovore za održavanje navedenih puteva sa odabranim izvođačima.

Evidentno je da postoji dvostruki pristup upravljanju i nadzoru aktivnosti održavanja na mreži ulica i puteva na teritoriji grada Kragujevca. Čini se da postoji jasno definisana granica nadležnosti između ove dve kancelarije gradske uprave. S druge strane, ovo može da predstavlja i smetnju za uvođenje PBMC šireg obima, koji treba da podstakne nadmetanje i privuče jače izvođače, ali može i da upravlja odlukom o obimu PBMC u vezi sa izborom ulica i puteva koji mogu da budu uključeni u ugovor odnosno ugovore (npr. jedan ugovor pokriva puteve u okviru GUP-a, a drugi van GUP-a).

Kragujevac se suočava sa ograničenim sredstvima za održavanje puteva. Tokom poslednjih nekoliko godina, grad je bio u mogućnosti da finansira samo redovno i zimsko održavanje puteva (čak i ovo sa uočljivim

## 2.2 Management and Maintenance Practice

City authorities, having particular role in management of streets and roads, and supervision of activities within the City limits are [10]:

- City Administration for Investments and
- City Administration for Communal and Inspection Affairs.

City Administration for Investments takes care of all roads uncovered by the General Urban Plan (GUP), as well as of all uncategorized roads within the GUP boundaries. On the other side, City Administration for Communal and Inspection Affairs has jurisdiction over the categorized local roads and streets within the boundaries of the GUP. In order to implement their management duties, they sign the annual contracts for maintenance of the named roads with the selected contractors.

It is evident that there is a dual approach to management and supervision of maintenance activities related to streets and roads network within the City of Kragujevac. It seems that there is a well-defined divided jurisdiction between these two City administration offices. On the other side, this may also present obstacle for introducing wide area PBMC that should encourage competition and attract stronger contractors, but may also govern decision about the scope of PBMC regarding selection of streets and roads that should be included in the contract(s) (e.g. one contract covering roads within the GUP and the other one outside the GUP).

City of Kragujevac is faced with limited funds for maintenance of roads. Over the past years, City was able

zaostatkom), dok je periodično održavanje, rekonstrukciju i izgradnju deonica državnih puteva obično finansiralo Javno preduzeće „Putevi Srbije” i u donekle međunarodne finansijske institucije (eng. *International Financial Institution [IFI]*) Bilo je i nekih radova na izgradnji i rekonstrukciji ulica, lokalnih puteva, kao i mreže nekategorizovanih puteva koji su finansirani iz gradskog budžeta. Ovo je realizovano u veoma malom obimu i vrlo sporo. Neki od ovih projekata čak nisu ni završeni. Konstatuje se da je kapacitet grada trenutno dovoljan da pokrije samo oko 10% neophodnog godišnjeg nivoa kapitalnog ulaganja.

Ulice i putevi u gradu Kragujevcu održavaju se na osnovu godišnjeg programa održavanja komunalne infrastrukture. Program uređuje održavanje komunalne infrastrukture, obim i količinu aktivnosti održavanja i finansijska sredstva neophodna za njegovu realizaciju. Program se realizuje putem ugovora s javnim komunalnim preduzećima (JKP) ili drugim kompanijama (obično iz privatnog sektora). Takođe, definiše uloge uključenih strana (gradska uprava, izvođači, nadzorna služba). Aktivnosti koje se tipično svrstavaju u održavanje puteva i ulica podeljene su između nekoliko izvođača u zavisnosti od stručnosti u okviru različitih JKP. Postoje i neke neuobičajene podelje poslova (npr. jedna kompanija održava kolovoz i trotoare – JKP „Čistoća”, a druga vodi računa o saobraćajnoj signalizaciji i uličnoj opremi – JKP „Parking servis Kragujevac”). Program definiše tipove aktivnosti održavanja komunalne infrastrukture od koji se dve stavke odnose na redovno i zimsko održavanje ulica. Ostale stavke sadrže aktivnosti koje obuhvataju preostale elemente poprečnog profila osim kolovoza i saobraćajnu signalizaciju i opremu. Program održavanja trebalo bi da je pripremljen u skladu s postojećom klasifikacijom ulica.

Za održavanje svih ulica i puteva, u proteklih nekoliko godina, bilo je potrebno približno dva i po miliona evra. Ako pogledamo iznose za ulice u okviru GUP-a, oni se kreću između 1 i 1,9 miliona evra. Kompletan ovaj iznos ne potroši se stvarno i to uglavnom zavisi od sredstava u gradskom budžetu. Postoji značajna neujednačenost dostupnih budžetskih sredstava u proteklih godinama. Kratka i krajnje opšta vizuelna procena stanja ulica u okviru grada pokazuje to da su obezbeđena sredstva daleko niža od dovoljnih za održavanje vrednosti imovine.

U 2014. godini, Skupština grada Kragujevca usvojila je Odluku o ulicama, lokalnim i nekategorisanim putevima [11], ali specifična lista ulica, lokalnih i nekategorisanih puteva, s relevantnim podacima koji opisuju barem dužine i poprečne profile, nije definisana. Osim toga, nijedna strana od onih uključenih u upravljanje i/ili održavanje puteva (npr. gradska uprava, izvođači) ne prikuplja podatke o inventaru i stanju ulica, lokalnih i nekategorizovanih puteva.

U stvarnosti, gradske vlasti dodeljuju aktivnosti (ne samo one koje se odnose na ulice i puteve, već uopšte) u zavisnosti od raspoloživih sredstava doznačenih od države na lokalni budžet, što se obično ne dešava u redovnim intervalima. Ovo se čak pogoršava s činjenicom da nikad nije bilo izvršeno planiranje aktivnosti. Prema informacijama kojima raspolaže gradska uprava, iznos namenjen za održavanje ulica i puteva u programu održavanja komunalne infrastrukture

to finance only routine and winter road maintenance (even these with significant backlog of activities), while periodic maintenance, reconstruction and construction of state roads' sections were usually financed by Public Enterprise "Roads of Serbia" and to a certain amount by International Financing Institutions (IFIs). There were some construction and reconstruction works on streets, local roads, as well as on uncategorized road network financed from the City budget. This was implemented at a very low rate and with slow progress. Some of these projects were not even completed. It is being said that the City's capacity at the moment is sufficient to cover only about 10% of necessary capital investments annually.

Maintenance of streets and roads in the City of Kragujevac is performed on the basis of Annual Program of Communal Infrastructure Maintenance. The Program arranges maintenance of communal infrastructure, scope and volume of maintenance activities and financial resources necessary for its implementation. The Program is implemented through contracts with Public Utility Companies (PUCs) or other companies (normally from the private sector). It also defines roles of all the parties involved (city authorities, contractors, supervision service). Activities typically falling under the maintenance of roads and streets are divided among several contractors in relation to the likely available specialization within the PUCs. There is also some unusual division of tasks (e.g. one company maintains pavements and sidewalks - PUC "Čistoća", and the other one takes care of traffic signalization and equipment of streets - PUC "Parking servis Kragujevac"). The Program defines types of communal infrastructure maintenance activities out of which two line items are related to routine and winter maintenance of streets. Other items contain activities related to the remaining elements of a cross section beside pavement and to the traffic signalization and equipment. Program of streets maintenance is said to be prepared in accordance with the existing streets classification.

The funds intended for maintenance of all streets and roads amounted approximately EUR 2.5 million in the past several years. Looking at the figures for streets within GUP only, this amount ranges between EUR 1 and 1.9 million. Not all of this amount is actually spent and this mostly depends on availability of resources in the City budget. There is significant inconsistency of available budgetary resources for the past years. The brief and very general visual assessment of streets condition within the city clearly shows that the amounts allocated are far from being sufficient to maintain the asset value.

In 2014, City Assembly adopted Decision on Streets, Local and Uncategorized Roads [11], but the specific list of streets, local and uncategorized roads, with relevant data describing at least lengths and cross section profile, was undefined. Likewise, none of the parties involved in management and/or maintenance of roads (City authorities, contractors, etc.) collect data on inventory and condition of streets, local and uncategorized roads.

In reality, City authorities assign the activities (not only those related to streets and roads, but in general) to available resources transferred from the state to local budget, which usually fails to happen in regular intervals. This gets even worse with the fact that planning of

procenjuje se obično na osnovu iskustva i on se generalno samo „preslikava” iz godine u godinu.

Upravljači putevima poveravaju radove na održavanju ulica, lokalnih i nekategorizovanih puteva pomoću preduzeća koje je osnovala gradska skupština za izvođenje ovih zadataka ili drugih preduzeća i preduzetnika, u skladu sa Odlukom o ulicama, lokalnim i nekategorisanim putevima [11]. Operativno, kompletno redovno i zimsko održavanje obavlja JKP „Čistoća” za obe oblasti (unutar i van granica GUP-a). Radovi se dodeljuju JKP-u „Čistoća” na osnovu Zakona o komunalnim uslugama [12], Zakona o javnim nabavkama [13] i nekoliko odluka [11, 14–17], koje je donela Skupština Grada Kragujevca kada je reč o dodeli ugovora i poveravanju komunalnih usluga koje omogućavaju direktno ugovaranje s JKP.

Radovi se obavljaju dok svi finansijski resursi ne budu potrošeni. Srećom, do sada se nije desilo da sva sredstva budu potrošena do zimске službe ili tokom poslednja dva-tri meseca u godini. Uglavnom zbog toga što se planiralo na empirijskoj bazi (JKP „Čistoća” može se smatrati iskusnim izvođačem koji je naučio proces tokom godina i prilagođava se dostupnim resursima).

Koristi se ugovor prema tradicionalnim metodama, koji definiše procese, materijale i količine, bez utvrđivanja rokova u kojima treba da se izvrši održavanje. Ugovor je podložan veoma detaljnom upravljanju gradske uprave. Plaća se na osnovu predmera i predračuna za utvrđene radove. Radovi na održavanju uglavnom su ograničeni na one koji su jednaki ponovnom uspostavljanju „normalnog” stanja i sadrže relativno ograničen broj aktivnosti – u skladu s gorepomenutim programom održavanja komunalne infrastrukture i odgovarajućim cenovnikom.

Kao i obično, izvođač radova na održavanju puteva ima obavezu da obezbedi zadovoljavajući dokaz kvaliteta korišćenih materijala i izvršenih radova, a nadzor potvrđuje usaglašenost sa uslovima i/ili uputstvima. Tehnički uslovi ne postoje, a opis radova definisan je programom održavanja komunalne infrastrukture i cenovnikom koji se prilaže uz obrazac ugovora. Gradska uprava prati i nadzire radove u ad-hoc maniru, s primarnim ciljem da potvrdi da su prijavljeni radovi završeni.

### 3 TEHNIČKA OCENA

Prilikom definisanja tipa primene, parametara učinka i vrednosti, kao i formata ugovora (u kasnijoj fazi) za PBM, treba imati u vidu sledeće faktore:

- obim imovine, osim kolovoza, koju treba održavati na osnovu ugovora;
- kapacitet izvođača;
- profil rizika koji se prenosi na izvođače u slučaju nepredviđenih događaja;
- predložene kriterijume učinka;
- minimalne inženjerske standarde;

activities has never been undertaken. According to the information available from the City administration, the amount allocated for maintenance of streets and roads in the Program of Communal Infrastructure Maintenance is normally estimated on the basis of experience and this figure is generally mapped from year to year.

Road managers entrust the works on maintenance of streets, local and uncategorized roads to companies established by the City Assembly to perform these tasks or to other companies and entrepreneurs based on the Decision on Streets, Local and Uncategorized Roads [11]. Operationally, the complete routine and winter maintenance is being performed by PUC “Čistoća” for both areas (within or outside the boundaries of the GUP). The works are entrusted to PUC “Čistoća” on the basis of the Law on Communal Services [12], Law on Public Procurement [13] and several decisions [11, 14–17] rendered by the Assembly of the City of Kragujevac on contracting and entrusting of communal services that allow direct contracting with PUCs.

Works are performed until all financial resources are spent. Luckily, up to now there has been no case that resources were spent until winter service or during the last 2-2,5 months of the year. This was mainly because the planning was done on an empirical basis (PUC “Čistoća” can be considered as experienced contractor that learned the process over the years and adapted to available resources).

Traditional method-based contract is utilized specifying the processes, materials, and quantities, without setting time schedules for performance of maintenance works. The contract seems to be subject to very detailed directions by the City Administration. The payments are made on the basis of Bill of Quantities (BoQ) for specified works. Maintenance works are mainly restricted to those that are equal to reinstatement of “normal” conditions and contain a rather limited number of activities in accordance with the aforementioned Program of Communal Infrastructure Maintenance and relevant pricelist.

As usual, the contractor of road maintenance works is obliged to provide satisfactory evidence on quality of used materials and performed works, and supervisory body confirms compliance with specifications and/or instructions. Technical specifications do not exist, while description of works is defined through the Program of Communal Infrastructure Maintenance and price list that is attached to contract form. Monitoring and supervision of works by the City Administration is done in an ad-hoc manner with the primary purpose to verify that the reported works have been completed.

### 3 TECHNICAL ASSESSMENT

When developing the application type, performance parameters and values, as well as the contract format (at the later stage) for PBM, the following factors have to be taken into account:

- extent of assets, in addition to pavement, that should be subject of maintenance under the contracts;
- contractors’ capacity;
- risk profile to be transferred to the contractors in the event of unforeseeable occurrences;
- proposed performance criteria;



– predloženi okvir kvaliteta za obezbeđenje usaglašenosti radova.

Optimalna veličina i lokacija za svaki pojedinačni ugovor o održavanju mogu se zasnivati na parametrima kao što su:

- lokacija;
- kategorija / tip puta;
- stanje puta;
- obim saobraćaja;
- kapacitet izvođača;
- troškovi održavanja;
- pristupačnost;
- topografija.

### 3.1 Opseg primene i obim ugovora

Analiza postojeće prakse održavanja ulica i lokalnih puteva pokazuje dvostruki pristup – jedan ugovor za ulice i puteve u okviru GUP-a i drugi za one van granica GUP-a. Takođe, napominje se da su svi nekategorisani putevi unutar GUP-a trenutno uključeni u ugovor koji pokriva područje van granica GUP-a. Zbog toga, postoji logičan pristup izboru područja koje će biti pokriveno eventualnim PBMC-om, a proučavane su sledeće opcije:

- (i) oblast unutar granica GUP-a;
- (ii) oblast izvan granica GUP-a;
- (iii) kompletna teritorija Grada Kragujevca.

Prve dve opcije potpuno su iste s postojećim stanjem, dok bi treća opcija predstavljala proširenje područja koje bi bilo pokriveno i može predstavljati značajnu prepreku za kapacitet lokalnih izvođača (iz javnog i privatnog sektora). Izbor područja treba da bude povezan i sa izborom puteva koje treba održavati.

Trenutno postoje praktično tri grupe ulica i puteva na teritoriji Grada Kragujevca:

- (i) ulice (arterijske, glavne, sabirne) u prosečnoj dužini od 95 km, s predviđenim produženjem do približno 210 km do kraja perioda planiranog GUP-om [18];
- (ii) lokalni kategorisani putevi u približnoj dužini od 305 km;
- (iii) lokalni nekategorisani putevi u približnoj dužini od 1.000 km.

S obzirom na poznatu teritoriju i opšte stanje mreže ulica, priprema tenderske dokumentacije za PBM i realizacija PBM ugovora trebalo bi da budu lakše za opciju (i). Takođe, ne bi postojala pretnja da će JKP „Čistoća” odmah izgubiti znatan deo prometa u slučaju javnih nabavki, što bi im omogućilo da koncentrišu napore na svoje glavno područje delovanja. Međutim, i dalje treba da se prikupljaju podaci o inventaru i postojećem stanju.

Ako se izaberu opcije (ii) i (iii), pripremanje tenderske dokumentacije (naročito) i ugovora biće komplikovanije, jer je potrebno precizno definisanje liste puteva koji se održavaju i prikupljanje znatne količine podataka o inventaru i trenutnom stanju. Treća grupa lokalnih nekategorisanih puteva uglavnom obuhvata prilazne puteve u ruralnom delu Grada Kragujevca, a oko 90% njegove dužine nema modernu kolovoznu konstrukciju. Stoga, ovo može zahtevati veliki trud izvođača u održavanju i verovatno neće dati relevantne rezultate za upoređivanje s drugim sličnim ugovorima u smislu kvaliteta puteva, rashoda, organizacije, i tako dalje.

– minimum engineering standards;  
– proposed quality framework for ensuring compliance of the works.

The optimal size and location of each individual maintenance contract may be based on such parameters as:

- location;
- road category/type;
- road condition;
- traffic volumes;
- contractor capacity;
- maintenance costs;
- accessibility;
- topography.

### 3.1 Range of Application and Scope of Contract

Analysis of the existing practice in maintenance of streets and local roads shows dual approach, i.e. one contract for streets and roads within the GUP and another one for those outside the GUP boundaries. It is also noted that all uncategorized roads within the GUP are currently included in the contract that covers area outside GUP boundaries. Therefore, there is a logical approach to selection of area to be covered by the eventual PBMC, and the following options were studied:

- (i) area within the GUP boundaries;
- (ii) area outside of the GUP boundaries;
- (iii) complete territory of the City of Kragujevac.

The first two options are exactly the same to the existing condition, while the third one would present enlargement of the area to be covered and may present a significant obstacle to the capacity of local contractors (both from the public and private sector). Selection of the area has to be connected also with selection of roads to be maintained.

Currently, there are practically three groups of streets and roads in the City of Kragujevac:

- (i) streets (arterial, main, collector) in the approximate length of 95 km with the estimated extension to approximately 210 km by the end of GUP planning period [18];
- (ii) local categorized roads in the approximate length of 305 km;
- (iii) local uncategorized roads in the approximate length of 1,000 km.

Given the known territory and general condition of the street network, preparation of the PBM bidding documents and PBM contract implementation should be easier for the option (i). Also, there would be no threat that PUC “Čistoća” would immediately lose significant portion of turnover in case of public procurement, and this would also enable them to concentrate their efforts to their main field of activity. Still, there is a need to collect data on inventory and condition.

When the options (ii) and (iii) are selected, preparation of bidding documents (in particular) and contract are more complicated because there is a need to precisely define list of roads to be maintained and collect significant amount of information on inventory and condition. The third group of local uncategorized roads mostly comprises of access roads in the rural area of the City of Kragujevac and about 90% of its length is unpaved. Therefore, this may require significant effort

Na osnovu detaljne analize raspoloživih podataka, predložen je sledeći obim mogućih PBMC:

- oblast unutar granica GUP-a;
- ulice (arterijske, glavne, sabirne);
- sva imovina u okviru profila ulice (npr. kolovoz, trotoari, ograde, zaštitne ograde, znaci, oznake na kolovozu, semafori, trgovi, vanredni radovi).

S dužinom od oko 100 km, ovo bi trebalo da bude atraktivno za potencijalne ponuđače, a bilo koji od lokalno dostupnih ugovarača trebalo bi da bude u stanju da se organizuje za izvođenje radova.

Trenutno, postoje četiri vrste ugovora u pogledu radova, to jest redovno i zimsko održavanje ulica i puteva, opremanje ulica, saobraćajna signalizacija i popravka trotoara. Ova podela verovatno je rezultat potencijalne dostupne specijalizacije unutar JKP-a. Održivi pristup bio bi da se svi radovi na održavanju ulica i puteva uključe u jedan ugovor, tako da postoji manje ugovora za upravljanje, čime se izbegava neprirodno razdvajanje zadataka unutar istog prostora (tj. poprečnog profila ulice/puta). Trebalo bi da postoji samo jedan izvođač koji vodi računa o jednoj grupi imovine i pruža jednu vrstu usluge.

Ako se šema PBM ugovaranja pokaže uspešnom, gradska vlast može je proširiti u skladu s gorenavedenim, kako bi pokrila šire područje ili uključila i lokalnu kategorizovanu putnu mrežu u obim ugovora.

### 3.2 Standardi održavanja i nivo usluge

Prilikom definisanja optimalnog nivoa usluge za svaku kategoriju puta, rad mora biti zasnovan na informacijama o trenutnom stanju, tipičnoj upotrebi puta i uobičajenim korisnicima, pristupačnosti. Različiti nivoi usluge mogu se primeniti na različite deonice puta, u zavisnosti od, na primer, nivoa saobraćaja, strukture saobraćaja, terena, stanja kolovoza, materijala i raspoloživog ugovaračkog kapaciteta. Usvajanje jedinstvenog nivoa usluge za sve deonice ili nekoliko setova nivoa za različite puteve ili deonice puteva obično se razmatra s poslodavcem, uz pažljivu analizu ekonomske održivosti (minimalni troškovi prevoza) preporučenih nivoa usluge.

U ovom slučaju, definicija i izbor nivoa usluge uglavnom će zavisiti od stanja svake deonice puta koja će biti uključena u ugovor. Neretko, kao što je slučaj i s Kragujevcem, lokalne vlasti ne prikupljaju redovno podatke o stanju, obimu saobraćaja ili čak opštem inventaru, ili imaju veoma zastarele podatke. Stoga, nije moguće izvršiti relevantnu ekonomsku procenu da bi se uspostavio nivo usluge za svaku kategoriju ulice/puta. Zbog toga je pripremljen okvir sistema koji predviđa pet različitih nivoa održavanja (standardi održavanja – MS), s obzirom na pet različitih nivoa usluge. Sistem se zasniva na funkcionalnoj kategorizaciji ulica i puteva u Kragujevcu, a uključuje i granične obime saobraćaja (tabela 3).

from the contractor in maintenance and probably will not present relevant results for comparison with other similar contracts in terms of roads quality, expenditure, organization, etc.

Upon the detailed analysis of the available information, the following scope of the possible PBMC is proposed:

- area within GUP boundaries;
- streets (arterial, main, collector);
- all assets within the street profile (pavement, sidewalks, railings, guardrails, signs, markings, traffic lights, squares, emergency works, etc.).

With total length of approximately 100 km, this should be attractive to potential bidders and any of the locally available contractors should be able to organize the performance of works.

Currently, there are four types of contracts in terms of works, i.e. routine and winter maintenance of streets and roads, equipping of streets, traffic signalization and sidewalk recovery. This division is probably the result of the specialization available within the particular PUCs. The sustainable approach would be to include all maintenance works for streets and roads in one contract thus having less contracts to manage and avoiding unnatural splitting of tasks within the same space (i.e. street/road cross section). There should be only one contractor taking care of one group of assets providing one type of service.

If the PBM contracting scheme proves to be successful, the City authorities can expand from the above to cover wider area or to include also local categorized road network in the scope of contract.

### 3.2 Maintenance Standards and the Level of Service

When defining the optimal Level of Service (LoS) for each type of road category, the exercise has to be based on the condition information, typical road uses and road user, affordability. Different LoS can be applied to different road sections depending on traffic levels, traffic structure, terrain, pavement condition, materials and contracting capacity available, etc. Whether uniform LoS for all sections will be adopted or several sets of levels for different roads or road sections is normally subject to discussion with the contracting authority and careful analysis of economic viability (minimum transport costs) of recommended LoS.

In this case, definition and selection of LoS will mainly depend on condition of each road section to be included in contract. It is common, and the case is same with the City of Kragujevac, that local authorities do not ordinarily collect information on condition, traffic levels, or even general inventory, or the information they have are very outdated. Therefore, it was not possible to perform relevant economic evaluation in order to establish LoS for each street/road category. For this reason, the outline of the system which envisages five different levels of maintenance (Maintenance Standards-MS) considering also five different LoS has been prepared. The system is based on functional categorization of streets and roads in the City of Kragujevac, including also the traffic volume thresholds (Table 3).

Tabela 3. Predloženi sistem nivo usluge/standard održavanja (MS) [6]  
Table 3. Proposed LoS/MS system [6]

Saobraćaj PGDS (vozilo/dan) <i>Traffic AADT (veh/day)</i>	NIVO USLUGE – ARTERIJE / LEVEL OF SERVICE - ARTERIAL STREETS				
	Standard održavanja / Maintenance Standard				
	MS1	MS2	MS3	MS4	MS5
> 5.000	Dobro <i>Good</i>	Zadovoljavajuće <i>Satisfactory</i>	Slabo <i>Poor</i>	Loše <i>Bad</i>	Loše <i>Bad</i>
2.501–5.000	Odlično <i>Excellent</i>	Dobro <i>Good</i>	Zadovoljavajuće <i>Satisfactory</i>	Slabo <i>Poor</i>	Loše <i>Bad</i>
1.001–2.500	Odlično <i>Excellent</i>	Odlično <i>Excellent</i>	Dobro <i>Good</i>	Zadovoljavajuće <i>Satisfactory</i>	Slabo <i>Poor</i>
751–1.000	Odlično <i>Excellent</i>	Odlično <i>Excellent</i>	Odlično <i>Excellent</i>	Dobro <i>Good</i>	Zadovoljavajuće <i>Satisfactory</i>
≤ 750	Odlično <i>Excellent</i>	Odlično <i>Excellent</i>	Odlično <i>Excellent</i>	Odlično <i>Excellent</i>	Dobro <i>Good</i>

Saobraćaj PGDS (vozilo/dan) <i>Traffic AADT (veh/day)</i>	NIVO USLUGE - GLAVNE ULICE / LEVEL OF SERVICE - MAIN STREETS				
	Standard održavanja / Maintenance Standard				
	MS1	MS2	MS3	MS4	MS5
> 5.000	Odlično <i>Excellent</i>	Dobro <i>Good</i>	Zadovoljavajuće <i>Satisfactory</i>	Slabo <i>Poor</i>	Loše <i>Bad</i>
2.501–5.000	Odlično <i>Excellent</i>	Odlično <i>Excellent</i>	Dobro <i>Good</i>	Zadovoljavajuće <i>Satisfactory</i>	Slabo <i>Poor</i>
1.001–2.500	Odlično <i>Excellent</i>	Odlično <i>Excellent</i>	Odlično <i>Excellent</i>	Dobro <i>Good</i>	Zadovoljavajuće <i>Satisfactory</i>
751–1.000	Odlično <i>Excellent</i>	Odlično <i>Excellent</i>	Odlično <i>Excellent</i>	Odlično <i>Excellent</i>	Dobro <i>Good</i>
≤ 750	Odlično <i>Excellent</i>	Odlično <i>Excellent</i>	Odlično <i>Excellent</i>	Odlično <i>Excellent</i>	Odlično <i>Excellent</i>

Saobraćaj PGDS (vozilo/dan) <i>Traffic AADT (veh/day)</i>	NIVO USLUGE – SABIRNE ULICE / LEVEL OF SERVICE - COLLECTOR STREETS				
	Standard održavanja / Maintenance Standard				
	MS1	MS2	MS3	MS4	MS5
> 5.000	Odlično <i>Excellent</i>	Odlično <i>Excellent</i>	Dobro <i>Good</i>	Zadovoljavajuće <i>Satisfactory</i>	Slabo <i>Poor</i>
2.501–5.000	Odlično <i>Excellent</i>	Odlično <i>Excellent</i>	Odlično <i>Excellent</i>	Dobro <i>Good</i>	Zadovoljavajuće <i>Satisfactory</i>
1.001–2.500	Odlično <i>Excellent</i>	Odlično <i>Excellent</i>	Odlično <i>Excellent</i>	Odlično <i>Excellent</i>	Dobro <i>Good</i>
751–1.000	Odlično <i>Excellent</i>	Odlično <i>Excellent</i>	Odlično <i>Excellent</i>	Odlično <i>Excellent</i>	Odlično <i>Excellent</i>
≤ 750	Odlično <i>Excellent</i>	Odlično <i>Excellent</i>	Odlično <i>Excellent</i>	Odlično <i>Excellent</i>	Odlično <i>Excellent</i>

Nivo usluge koji pruža određeni standard održavanja biće niži na ulici/putu višeg funkcionalnog ranga, ali veći na putu s nižim saobraćajnim opterećenjem. Redovno održavanje podrazumeva izvršenje određene serije zadataka, osmišljenih da obezbede to da se svaka ulica

The LoS provided by a specific MS will be lower on a street/road of higher functional type and will be higher on a road of lower traffic class. Routine maintenance involves the execution of a specific series of tasks designed to ensure that each street/road is maintained

/ svaki put održava na propisanom nivou usluge. Uopšteno, razlika između standarda održavanja leži u učestalosti izvršenja ili dozvoljenom kašnjenju pre izvršenja potrebnih zadataka, a ne u samim stvarnim zadacima. Održavanje MS1 na arterijskoj ulici s klasom saobraćaja 1, obezbediće „dobar” nivo održavanja; isti MS1 standard održavanja na glavnoj ulici koja ima klasu saobraćaja 1, obezbediće „odličan” nivo usluge.

### 3.3 Ugovor

Na osnovu analize postojećeg sistema ugovaranja održavanja puteva u Kragujevcu, kao i iskustava u drugim sličnim zemljama, predlaže se obrazac višegodišnjeg ugovora o održavanju puteva koji obuhvata određene kriterijume učinka koji će se zasnivati na jediničnim troškovima i nivou usluge u zavisnosti od kategorije puta („hibridni” model ugovora). Neke usluge se plaćaju na osnovu merenja korištenjem jediničnih cena, dok su druge povezane sa zadovoljenjem kriterijuma učinka i plaćaju se u jednakim ratama za vreme trajanja ugovora.

Ovo pretpostavlja sledeće načine plaćanja:

– PS – paušalna suma (plaća se u određenom broju jednakih rata);

– JC – jedinična cena.

Novi ugovor treba da obuhvati:

– redovno održavanje odabranih kategorisanih ulica (arterije, glavne, sabirne) unutar granica GUP-a, na osnovu definisanih nivoa usluge i kriterijuma učinka;

– zimsko održavanje odabranih kategorisanih ulica (arterije, glavne, sabirne) unutar granica GUP-a u skladu s postojećom praksom zimskog održavanja, na osnovu definisanih nivoa usluge i kriterijuma učinka;

– vanredni radovi na odabranim kategorizovanim ulicama (arterije, glavne, sabirne) unutar granica GUP-a na osnovu posebnog predmeta i predračuna za svaki slučaj vanrednog stanja ili događaja.

Predviđa se da pilot-PBMC bude na period od tri godine. Ovo se smatra dovoljno dugim periodom za procenu učinka, s obzirom na to što je ugovor u suštini samo za redovno održavanje. Tri godine će potencijalnim ponuđačima i gradskoj upravi dati šansu da se uhvate u koštac s pojmom višegodišnjeg ugovora, bez vezivanja svih strana u dugoročnom formatu koji bi zahtevao reviziju. Najvažnije, dugoročni (tri godine) pilot-„hibridni” PBMC, s mogućnošću potencijalnog još dužeg kasnijeg punog PBMC (pet+ godina), povećava šanse za uspešan rast javnih i privatnih kompanija, budući da investitori generalno preferiraju dugoročnu stabilnost i poslovnu održivost za svoju investiciju.

Ukupna procenjena vrednost pilot-PBMC-a od tri godine – za redovno i zimsko održavanje odabranog područja i obima radova – jeste tri i po ili četiri miliona evra (sa 20% nepredviđenih troškova).

Analizom postojećih ugovora, kao i programa održavanja komunalne infrastrukture i zvaničnog cenovnika, razvijena je lista aktivnosti održavanja predloženih u okviru „hibridnog” PBMC-a. Ove aktivnosti pokrivaju u osnovi kompletan profil ulice (tj. kolovoz, sistem za odvodnjavanje, kosine, saobraćajna signalizacija i oprema, objekti, trotoari, pešačke staze, parkirališta, trgovi), kao i određene radove i usluge (snimanje inventara i stanja, zimsko i vanredno

at its prescribed LoS. In general, the difference between MS lies in the frequency of execution or the permitted delay before execution of the required tasks rather than in the actual tasks themselves. Maintenance carried out to MS1 on an arterial street with traffic class 1, will provide a “Good” LoS; the same MS1 standard of maintenance on a main street having traffic class 1, will provide an “Excellent” LoS.

### 3.3 The Contract

Based on the analysis of existing road maintenance contracting system in the City of Kragujevac, as well as on the experience in other similar countries, the template of multi-annual road maintenance contract including some performance criteria that will be based on unit costs and LoS depending of the road category (“hybrid” contract model) is proposed. Compensation for some services is paid on the basis of measurement using unit prices, while others are linked to meet performance indicators and paid in equal instalments during the term of contract.

This presumes the following methods of payment:

– LS - Lump Sum (to be paid in number of equal instalments);

– UP - Unit Price.

The new contract should cover:

– routine maintenance of selected categorized streets (arterial, main, collector) within the GUP boundaries on the basis of defined LoS and performance criteria;

– winter maintenance of selected categorized streets (arterial, main, collector) within the GUP boundaries in accordance with existing winter maintenance practice and on the basis of defined LoS and performance criteria;

– emergency works at selected categorized streets (arterial, main, collector) within the GUP boundaries on the basis of separate BoQ for each occurrence of emergency situation or event.

It is anticipated that the pilot PBMC will be for a period of three years. This is considered long enough for an assessment of performance, since the contract is essentially for routine maintenance only. Three years will give the eventual bidders and City Administration a chance to come to grips with the notion of the multi-annual contract without tying all parties into a longer term format which requires revision. Most importantly, longer term (three years) pilot “hybrid” PBMC, with prospect of potential even longer subsequent full PBMC (five+ years) would boost chances of successful growth of public and private companies, as investors generally prefer long-term stability and business viability for their investment.

Total estimated value of three years’ pilot PBMC for routine and winter maintenance of selected area and scope of works is EUR 3.5-4 million (with 20% contingencies).

Through the analysis of existing contracts, the Program of Communal Infrastructure Maintenance and official price list, the list of maintenance activities proposed to be performed within the scope of the “hybrid” PBMC has been developed. These activities cover basically complete profile of the street (i.e. carriageway, drainage facilities, slopes, traffic

održavanje). Predložene aktivnosti održavanja, kao i osnova za plaćanja, zavise od određene oblasti, zapravo, od vrste, obima i stanja ulične/putne imovine i mogu se ponovo preispitati i modifikovati od slučaja do slučaja. Oni takođe mogu biti predmet pregovaranja/dogovora sa odabranim izvođačem u slučaju postupka nabavke s direktnim pregovaranjem.

Predloženim aktivnostima održavanja treba takođe dodeliti neke parametre u pogledu učinka, koji se obično definišu tehničkim uslovima za radove održavanja. Iako se mogu pripremiti i koristiti kao opšti tehnički uslovi, ovo nije uobičajen slučaj u praksi održavanja na osnovu učinka. U stvari, prilikom pripreme svakog ugovora za koji se vrši nabavka, treba pregledati i prilagoditi određene uslove, prema potrebi, kako bi odrazili specifične zahteve određenog ugovora, u zavisnosti od stvarnog stanja ulica/puteva. Ipak, pripremljena je preliminarna lista pokazatelja učinka za sve identifikovane stavke radova (tabela 4). Napominje se to da su predloženi nivoi i pokazatelji učinka samo indikativni. U Kragujevcu treba sprovesti opšte prikupljanje podataka i precizno definisanje stanja mreže tokom pripreme za realizaciju PBM ugovora, nakon čega sledi definicija kriterijuma učinka.

signalization and equipment, structures, sidewalks, foot-paths, parking lots, squares), and some specific works and services (inventory and condition surveys, winter and emergency maintenance). Proposed maintenance activities as well as basis for payments depend on specific area - actually on type, extent and condition of street/road assets and can be re-examined and modified from case to case. They can also be subject to negotiation/agreement with selected contractor in case of direct negotiated procurement procedure.

Proposed maintenance activities should also be provided with some performance related parameters and these are usually developed through technical specifications for maintenance works. Although they can be developed and utilized as general specifications, this is not a common case in PBM practice. In fact, while preparing each contract to be procured, particular specifications have to be reviewed and adjusted as necessary to reflect specific requirements of the particular contract depending of actual condition of streets/roads. Nevertheless, the preliminary list of performance indicators for all identified work items has been developed (Table 4). It has to be pointed out that the proposed targets and performance indicators are only indicative. Wider data collection and precise definition of the network's condition have to be performed during preparation to implement the PBM contracting in the City of Kragujevac followed by definition of performance criteria.

*Tabela 4. Primer preliminarnog skupa nekoliko indikatora učinka za redovno održavanje kolovoza [6]*  
*Table 4. Sample of preliminary set of several performance indicators for routine maintenance of carriageway [6]*

operativni indikator / <i>operational indicator</i>	jedinica mere <i>unit</i>	standard održavanja / <i>maintenance standard</i>				
		MS1	MS2	MS3	MS4	MS5
Rupe, maksimalan dozvoljeni broj po kilometru <i>Potholes, maximum number per km allowed</i>	kom. / <i>pcs</i>	0	0	0	0	0
Rupe, vreme odziva <i>Potholes, response time</i>	dani / <i>days</i>	1	1	5	7	14
Pukotine, maksimalna dozvoljena širina <i>Cracks, maximum width allowed</i>	mm	5	5	5	10	10
Zalivanje pukotina 1–5 mm, vreme odziva <i>Cracks sealing 1-5 mm, response time</i>	dani / <i>days</i>	28	28	28	28	28
Zalivanje pukotina >5 mm, vreme odziva <i>Cracks sealing &gt; 5mm, response time</i>	dani / <i>days</i>	2	2	2	5	7
Višestruke pukotine, dozvoljena površina <i>Multiple cracks, allowable area</i>	m <sup>2</sup>	0	0	1	3	3
Višestruke pukotine, vreme odziva <i>Multiple cracks, response time</i>	dani / <i>days</i>	7	7	7	14	14
Kolotrazi / <i>Rutting</i>	mm	bez kolotruga / <i>no rutting</i>				
Kolotrazi > 40 mm, vreme odziva <i>Rutting &gt; 40 mm, response time</i>	dani / <i>days</i>	7	7	7	14	28
Kolotrazi 10–40 mm, vreme odziva <i>Rutting 10 - 40 mm, response time</i>	dani / <i>days</i>	14	14	21	28	56
Površinski lom / <i>Surface failure</i>	m <sup>2</sup>	nema loma / <i>no failure</i>				
Površinski lom, vreme odziva <i>Surface failure, response time</i>	dani / <i>days</i>	2	2	2	7	7
Lom ivice kolovoza, dozvoljena površina <i>Edge break, allowable area</i>	m <sup>2</sup>	0	0	0	0	0
Lom ivice kolovoza, vreme odziva <i>Edge break, response time</i>	dani / <i>days</i>	7	7	7	14	28

Nepostupanje u skladu s pokazateljima učinka ili popravke otkrivenog odstupanja u što kraćem roku imaće negativan efekat na plaćanje izvođača, putem niza jasno definisanih kazni. U slučaju nepoštovanja pokazatelja učinka u određenim intervalima pregleda, sistem kaznenih poena uvodi „negativne“ bodove za neusaglašenost izvođača radova kojima se smanjuje veličina paušalnog iznosa po km/mesecu, na koji bi – u suprotnom – imao pravo u slučaju potpune usklađenosti s pokazateljima učinka. Dostizanje određenog broja kaznenih poena, u određenim okolnostima može da uzrokuje i raskid ugovora. Može se postaviti još jedan tip kriterijuma – da izvođač radova ima pravo na produženje ugovora ako ne dostigne određeni broj kaznenih poena.

Pre nabavke radova i ugovaranja, Gradska uprava mora urediti inventar i prikupljanje podataka. Ona treba da:

- (i) tačno odredi inventar koji treba ugovoriti (npr. ulice, putevi, dužine, elementi poprečnog profila, saobraćajna signalizacija i oprema);
- (ii) tačno utvrdi stanje imovine koja se ugovara;
- (iii) definiše pokazatelje učinka u ugovoru;
- (iv) izvrši preliminarnu procenu troškova;
- (v) definiše proces nadzora.

Da bi se ubrzao proces ugovaranja PBM-a i učinio se efikasnijim, ugovor se može direktno dodeliti putem pregovaračkog postupka sa izabranim JKP-om, u skladu sa odgovarajućim zakonima. Uvođenje pilotskih ugovora o održavanju na osnovu učinka za redovno i zimsko održavanje biće brže, jer se izbegava dugotrajna procedura nabavke, bez straha od neuspešnog postupka nabavke. Pri razmatranju ovog predloga, smatralo se da on nudi i najbolje šanse za uspešnu realizaciju pilot-programa zbog inicijalnog učešća izvođača radova i dogovorene prirode konačnog ugovora. Međutim, sa sobom nosi problem da se ne bi ostvario cilj uvođenja održavanja na osnovu učinka u domenu konkurentnih tendera.

Predloženi pristup ima tendenciju da uspostavi jedinstvenu ravnotežu rizika između poslodavca (tj. grad Kragujevac) i izvođača, koristeći pristup „hibridnog“ ugovaranja održavanja na osnovu učinka za redovno i zimsko održavanje. Hibridni ugovor za redovno i zimsko održavanje kombinuje elemente klasičnih stavki po količini (stavke predmera i predračuna) i jediničnih cena za plaćanje izmerenih radova, sa elementima stvarnog učinka zasnovanog na pokazateljima.

Na taj način, različiti elementi s većim rizikom će se izvršavati putem predmera i predračuna, a ne s jednostavnim paušalnim iznosom, i verovatno bi omogućili relativno „bezbolan“ prelazak s postojećeg načina ugovaranja za redovno održavanje. Time bi se nastavilo s prihvatljivim balansom rizika između poslodavca i ugovarača koji je već postignut putem postojećih ugovora koji se uglavnom zasnivaju na cenama i količinama iz predmera i predračuna, krećući se prema punom ugovoru o održavanju na osnovu merenja učinka.

Bilo bi održivije i korisnije za kvalitet saobraćajne infrastrukture ukoliko bi izvođač bio specijalizovan bez obzira na to da li to dolazi iz privatnog ili javnog sektora. Ako je željena opcija gradskih vlasti da angažuju izvođača iz javnog sektora, predlaže se da se kreira JKP sa odgovarajućim kapacitetom za održavanje ulica i puteva. Ovaj kapacitet se može stvoriti preuzimanjem specijalizovanog osoblja i opreme iz postojećih JKP koji

Failure to comply with the performance indicators or to promptly rectify revealed deficiencies adversely affects the contractor's payment through a series of clearly defined penalties. In case of non-compliance with performance indicators at specified inspection intervals, demerit points system introduces “negative” points for non-compliant contractors that will decrease amount of lump sum per km/month payment he would otherwise be entitled to in case of full compliance with performance indicators. Reaching certain number of demerit points may in particular circumstances lead to contract termination. Another type of criteria can be also set, i.e. the contractor shall be eligible for contract extension if he does not reach certain number of demerit points.

Prior to procurement of works and contracting, the City Administration has to arrange the inventory and collection of data. It needs to:

- (i) accurately determine inventory to be contracted out (streets, roads, lengths, cross section elements, traffic signalization and equipment, etc.);
- (ii) accurately determine condition of assets to be contracted out;
- (iii) define performance indicators in the contract;
- (iv) undertake preliminary cost estimates;
- (v) specify a monitoring process.

To speed up the process of PBM contracting implementation and make the whole process more efficient, contract can be directly awarded through negotiated procedure with the selected PUC, in accordance with the relevant legislation. Introduction of pilot PBMCs for routine and winter maintenance will be faster avoiding lengthy procurement procedure, without fear of unsuccessful tendering. In considering this proposal, it was thought that it might also offer the best chance of a successfully implemented pilot because of the initial contractor participation and the agreed nature of the final contract. However, it carries with it the problem that it would not advance the aim of bringing PBM into the realm of competitive tendering.

Proposed approach tends to establish the uniform balance of risks between the employer (i.e. City of Kragujevac) and the contractor, by using a “hybrid” PBM contracting approach for routine and winter maintenance. A hybrid contract for routine and winter maintenance combines elements of “classic” quantity based items (BoQ items) and unit rates for payment of measured work, with elements of true performance-based indicators.

This way, various higher risk elements of the work will be done via BoQ format rather than plain lump sum and will hopefully facilitate relatively “painless” transition from the current contracting method for routine maintenance. It will continue with the acceptable balance of risks between the employer and the contractor already achieved through existing contracts mostly based on BoQ unit rates and quantities measurement, towards a full PBMC.

It would be more sustainable and beneficial to quality of traffic infrastructure if the contractor would be a specialized one regardless of whether it comes from the private or public sector. If the preferred option by the City authorities is to employ public sector contractor, it is proposed to create PUC with the relevant capacity to maintain streets and roads. This capacity can be created

su već angažovani na održavanju ulica i puteva i njihovim daljim jačanjem u periodu od 2–3 godine. S takvim pristupom, grad bi kreirao zaista jedinstvene kapacitete za veoma specijalizovane službe pod vrlo specifičnim uslovima.

### 3.4 Akcioni plan

Prvi korak u realizaciji ugovaranja održavanja na osnovu merenja učinka treba da sadrži pilot-ugovor o održavanju na osnovu merenja učinka. Ceo proces treba da bude završen u tri faze, kao što sledi:

- (i) izmena regulative (u trajanju od šest meseci od započinjanja aktivnosti);
- (ii) priprema i faza ugovaranja (u trajanju od dvanaest meseci od započinjanja aktivnosti)
  - izbor obima ugovora
  - prikupljanje podataka o imovini
  - razvoj pokazatelja učinka i učinka
  - priprema konkursne dokumentacije
  - nabavka i ugovaranje
  - nabavka usluga tehničke pomoći;
- (iii) faza realizacije (u trajanju od trideset šest meseci od završetka faze II)
  - realizacija radova
  - nadzor/nadgledanje
  - merenje i plaćanje
  - pomoć gradskoj administraciji
  - ocena rezultata i identifikacija budućih

koraka.

Nakon završetka pilot-projekta s pozitivnim ishodom, gradske vlasti mogu da nastave s realizacijom ugovora na osnovu merenja učinka koji pokriva istu oblast, ili čak da ga prošire tako da pokrije kompletnu teritoriju Kragujevca (oblasti unutar i izvan granica GUP-a). Pored toga, gradske vlasti se mogu odlučiti da pokrenu višegodišnji ugovor na bazi merenja učinka koji bi obuhvatio i redovno i periodično održavanje, tj. da nastave s „potpunim” ugovorom na osnovu merenja učinka. Ovakav ugovor doneo bi korist dodeljivanjem na takmičarskoj osnovi.

## 4 PRAVNA PROCENA

PBM ne može da funkcioniše u neodgovarajućem zakonodavno-pravnom okruženju. Mora postojati odgovarajući zakonski i budžetski okvir koji bi mogao da odgovori zahtevima ugovaranja PBM – prvenstveno dugog trajanja ugovora, odgovarajućih budžetskih obaveza u budućnosti i potrebe za uvođenjem ugovornih kazni zbog lošeg učinka ili neispunjavanja učinka.

Trenutno, nacionalno zakonodavstvo – pozivajući se na široko prihvaćene principe pravičnosti i transparentnosti – uvodi neke izuzetke koje u predmetnom slučaju, čak i nakon pažljive analize, ostavljaju nejasnoće i neizvesnost.

Dok – s jedne strane – svi važeći zakoni i podzakonski akti promovišu transparentnost i konkurentnost prilikom nabavke komunalnih usluga, svi izuzeci dozvoljavaju dvostruke standarde. Ovo se posebno odnosi na kašnjenje u popisu poslodavaca na

by overtaking specialized staff and equipment from the existing PUCs already engaged in maintenance of streets and roads, and their further strengthening in the period of 2-3 years. With such approach the City would create a really unique capacity for very specialized service in a very specific conditions.

### 3.4 Action Plan

The first step in implementation of PBM contracting should include pilot PBMC. The whole process should be accomplished in three phases, as follows:

- (i) Legislation amendment (in duration of six months from the commencement of the activities);
- (ii) Preparation and contracting phase (in duration of twelve months from the commencement of the activities)
  - selection of contract scope
  - asset data collection
  - development of performance requirements and specifications
    - preparation of bidding documents
    - procurement and contracting
    - procurement of technical assistance services;
- (iii) Implementation phase (in duration of thirty-six months from the completion of phase II)
  - implementation of works
  - supervision/monitoring
  - measurement and payment
  - providing assistance to City Administration
  - evaluation of results and identification of future steps.

Upon the completion of the pilot project with positive outcomes, City authorities may continue PBMC implementation covering the same area, or even expanding it to cover complete territory of the City of Kragujevac (both areas within and outside the boundaries of the GUP). Furthermore, City authorities may also decide to launch multi-annual PBMC covering both routine and periodic maintenance, i.e. to continue with “full” PBMC. Such contract would benefit from being awarded on the competitive basis.

## 4 LEGAL ASSESSMENT

PBM contracting cannot operate in an unsuitable legislative and regulatory environment. There must be an appropriate legal and budgetary framework in place to accommodate the requirements of PBM contracting – principally the lengthy contract durations, the corresponding forward budgetary commitments and the need to levy contractual penalties for poor performance or non-performance.

Current national legislation, while invoking broadly accepted principles of fairness and transparency, introduces some exceptions which in the case of the subject matter even after careful review allow for ambiguity and uncertainty.

Whilst on one hand all the applicable laws and bylaws promote the transparency and competitiveness during procurement of communal services, all the exceptions allow double standards. This is specifically

koje se ne primjenjuje Zakon o javnim nabavkama [13] i zamenjivanje nedostajuće liste pojedinačnim odlukama.

S druge strane, višegodišnji ugovori ograničeni su na maksimalno tri godine [19] i nejasno je to da li PBMC mogu biti uspešno realizovani i da li mogu biti postignuti ciljevi u okviru tog ograničenog perioda u smislu „vrednosti za novac“ i „ulaznih elemenata prema rezultatima“, bez realizacije predloženih promena u nacionalnom zakonodavstvu.

Ne postoji potreba da se predlažu izmene i dopune postojećeg regulatornog okvira kako bi se omogućilo isključivanje Zakona o javnim nabavkama [13] u slučaju finansiranja od strane međunarodnih finansijskih institucija. Ukoliko su potpisani sporazumi o zajmu, biće primenljiva relevantna konkursna dokumentacija i uslovi ugovora u njoj. U smislu nacionalnog zakonodavstva, uvođenje ugovora o PBM-u jeste radikalna transformacija i idealno bi bilo realizovati neke zakonske i proceduralne promene koje bi omogućile definisanje višegodišnjih ugovora sa osiguranim godišnjim plaćanjima za postizanje definisanog učinka. Trenutno, svaki godišnji budžet zavisi od dostupnih sredstava i odluka o relativnim prioritetima.

Mišljenje autora jeste da se s takvim sistemom ne mogu realizovati prednosti višegodišnjih PBMC-a. Preporučuje se da se pronađu pravna ili proceduralna sredstva koja pružaju izvođačima mnogo viši stepen sigurnosti u prihodima koji se mogu očekivati iz višegodišnjeg ugovora. Na primer, Ministarstvo finansija može usvojiti i objaviti unutrašnju politiku s ciljem ispunjavanja višegodišnjih ugovora s fiksnom vrednošću do definisanog nivoa u svakom sektoru, ili samo u sektoru puteva, bez obzira na buduća budžetska ograničenja. Druga opcija s ciljem punog efekta rezultata PBMC-a bila bi da se utvrde takve izmene i dopune, kako bi se omogućilo zaključivanje višegodišnjih ugovora za period koji prelazi tekući limit od tri godine.

Pored toga, radi povećanja konkurentnosti i efektivnosti usluga održavanja uopšte za primenu PBM ugovora, neophodno je obeshrabrili bilo kakvo izuzeće Zakona o javnim nabavkama [7]. Ovo je izvodljivo ograničavanjem komunalnih usluga na listu usluga koje se mogu poveriti.

## 5 ISPITIVANJE TRŽIŠTA

Mora postojati adekvatan i voljan ugovarački kapacitet koji je na raspolaganju za realizaciju PBMC-a. Rad u okviru PBM okruženja suočava izvođače s novim iskustvom i izazovima; ne žele svi izvođači da uđu u ovo okruženje i od onih koji žele, nisu svi spremni da prihvate nove odgovornosti koje moraju da snose.

Procenjena je sposobnost i spremnost privatnih izvođača radova u regionu Kragujevca za sprovođenje redovnog održavanja uopšte, ali i prema PBMC šemi [8]. Pored toga, analiziran je i kapacitet izvođača u javnom sektoru.

Nijedno od preduzeća nema nikakva iskustva s PBM-om i to može da predstavlja najvažniji operativni rizik za realizaciju koncepta. Trenutno, čini se da su domaće kompanije (sudeći po njihovom tehničkom i finansijskom kapacitetu) sposobne da sprovedu ugovore o jednostavnom redovnom održavanju s nekim karakteristikama PBMC-a (zapravo, „hibrid“ koji kombinuje svojstva ugovora prema merenju količina i

related to delay in listing the contracting authorities to which the Law on Public Procurement [13] does not apply and substituting the missing list with individual decisions.

On the other hand, multi-annual contracts are limited to maximum three years [19] and it is unclear if the PBMCs can be successfully implemented and the goals achieved within this limited period in terms of “value for money” and “input against outputs”, without implementing proposed changes in national legislation.

There is no need to propose amendments to the current regulatory framework in order to allow exclusion of the Law on Public Procurement [13] in case of financing by IFIs. If loan agreements are signed the relevant bidding documents and conditions of contract therein agreed shall be applicable. In terms of national legislation, introduction of PBM contracting is a radical transformation, and would ideally require some legislative and procedural changes to allow multi-annual contracts to be written with assured annual payments for achievement of performance targets. At present each year's budget is subject to availability of funds and decisions about relative priorities.

The opinion of the author is that the full benefits of multi-annual PBMCs cannot be realized with such a system. It is recommended that legal or procedural means be found to give contractors a much greater degree of certainty about the revenue they can expect from a multi-annual contract. For example, the Ministry of Finance might adopt and announce an internal policy to honour multi-annual fixed-payment contracts up to a defined ceiling in each sector, or in the roads sector alone, irrespective of future budgetary restrictions. Another option in order to give full effect to the results of PBMCs would be to develop such amendments to allow conclusion of multi-annual contracts for a period beyond the current limit of three years.

In addition, to enhance competitiveness and effectiveness of the maintenance services in general for application of PBM contracting any waiver of the Law on Public Procurement [7] should be discouraged. This could be done by limitation of communal services to a list of services which can be entrusted.

## 5 MARKET SOUNDING

There must be adequate and willing contracting capacity available to undertake the PBMCs. Operating within the PBM environment faces contractors with a new experience and challenges; not all contractors wish to enter this environment and of those that do, not all of them are willing to accept the new responsibilities which they must carry.

The ability and willingness of private contractors in the region of Kragujevac to carry out routine maintenance in general, but also under a PBMC scheme was assessed [8]. Furthermore, capacity of the public sector contractors has been also analysed.

None of the companies has any experience in PBM and this can present the most important operational risk for the implementation of the concept. At the moment it appears that local companies (judging from their technical and financial capacity) are capable to perform simple routine maintenance contracts with some features of PBMCs (actually “hybrid” one combining



ugovora na osnovu učinka).

Takođe, značajno je napomenuti i to da se najveće vrednosti ugovora za privatne izvođače kreću od nekoliko stotina evra do više od milion evra, ali u proseku oko 0,5 miliona evra. Pod pretpostavkom da je reč o ugovorima s trajanjem tokom jedne građevinske sezone ili najviše godinu dana, može se zaključiti da domaće kompanije mogu konzumirati približnu vrednost godišnjeg ugovora u rasponu od 0,5 do 1,5 miliona evra. Ovo je ocenjeno kao dovoljno visoko da zadovolji potrebe PBM ugovaranja za održavanje puteva i ulica u Kragujevcu.

Jedino istraženo preduzeće u javnom sektoru (JKP „Čistoća“) ima jedinstveno iskustvo u redovnom i zimskom održavanju na području Kragujevca. Ovo je udvostručeno s dostupnošću objekata širom grada. To je velika organizacija s vrlo ograničenom nezavisnošću, s obzirom na to što su u većinskom vlasništvu Grada Kragujevca i umnogome posluju putem direktnih ugovora koje dodeljuje Grad Kragujevac. Takođe, očigledno je to da je pružanje usluga održavanja ovog preduzeća više poput prinudnog rešenja u odsustvu relevantne specijalizacije unutar raspoloživih JKP-a, nego stvarna želja JKP „Čistoća“ da obavlja ove radove (samo oko 11% prometa).

Obuka i jačanje kapaciteta koji poboljšavaju razumevanje privatnih ugovarača o strukturi PBMC-a mogu poboljšati učinak izvođača radova i povećati broj firmi koje mogu da podnesu ponudu za ove ugovore. Takav pristup treba da se primeni i za Grad Kragujevac, a sesije posvećene obuci i jačanju kapaciteta mogu se proširiti da bi obuhvatile šire područje u centralnoj Srbiji, kako bi se omogućila bolja konkurencija i uspeh ukoliko se odluči za nastavak javne nabavke.

## 6 INSTITUCIONALNI KAPACITET

Procena kapaciteta javnog sektora upravljanja i nadzora za obavljanje redovnog i zimskog održavanja u okviru PBMC-a otkrila je neke nedostatke u procesu i unutrašnjoj organizaciji.

Gorenavedene kancelarije gradske uprave imaju praktično tradicionalnu organizaciju upravljanja s nekim prelaznim elementima (tabela 5). Ove kancelarije pokazale su da imaju jasno razumevanje svoje funkcije i strukture, ali obavljaju i određenu količinu zadataka koji se preklapaju. Iako su one okarakterisane kao manje strukture s povećanim angažovanjem spoljašnjih dobavljača, ovo angažovanje u osnovi je u javnom sektoru, barem u pogledu pružanja aktivnosti održavanja ulica i puteva.

features of both method-based and performance-based contracts).

It is also significant to mention that the highest contract values for private contractors range from couple of hundreds EUR to more than a million, but the average is about EUR 0.5 million. Assuming that these are contracts with duration over one construction season or one-year maximum, it can be concluded that local companies can consume approximate value of an annual contract in the range EUR 0.5 to 1.5 million. This is estimated as sufficiently high to satisfy the needs of PBM contracting for maintenance of roads and streets within the City of Kragujevac.

The only public sector company surveyed (PUC “Čistoća“) has unique experience in routine and winter maintenance in the Kragujevac area. It is doubled with the availability of facilities around the City. It is a large organization with very limited independence, given that they are majority-owned by the City and to great extent operate through direct contracts awarded by the City of Kragujevac. It is also clear that provision of maintenance services by this company is more like a forced solution in the absence of relevant specialization within available PUCs than a real wish of the PUC “Čistoća“ to perform these works (only about 11% of turnover).

Training and capacity building sessions that improve private contractors' understanding of the structure of PBMCs can improve contractors' performance and increase the number of firms able to bid for these contracts. Such approach should also be implemented for the City of Kragujevac and training and capacity building sessions may be spread to cover wider area in the central Serbia in order to enable better competition and success if decided to proceed with the public procurement.

## 6 INSTITUTIONAL CAPACITY

Assessment of management and supervision capacity of the public sector to carry out routine and winter maintenance under a PBMC revealed some deficiencies in the process and internal organization.

The above involved City administration offices are practically traditional management organization, with some transitional elements (Table 5). These offices demonstrate that they have clear understanding of their functions and structure, but they also perform a certain volume of overlapping tasks. Although they are characterized as smaller structures with increased outsourcing of activities, the outsourcing is basically to public sector, at least regarding to provision of maintenance activities of streets and roads.

Tabela 5. Karakteristike organizacija upravljanja putevima [6]

	tradicionalno	mešovito (tranziciono)	moderno
regulatorni kontekst	regulisanje višestrukih procesa i jedinica	učinak sprečen konfliktnim ulogama i odgovornostima	koordinirani propisi koji promovišu visok stepen transparentnosti i upravljanje ključnim rezultatima
strukturne karakteristike	velike organizacije sa operacijama koje vrše javna preduzeća koji imaju centralizovanu kontrolu i minimalnu delegaciju	manja veličina s povećanim poveravanjem funkcija spoljašnjim dobavljačima	fokusiranje na rezultate s malo radne snage koja oslobađa konkurentne snage u odnosu na troškove i kontrolu kvaliteta
osnovne usluge (planiranje, projektovanje, izgradnja, održavanje)	fokus na tehničkoj i funkcionalnoj oblasti umesto na dugoročnoj strategiji i efektivnosti	očekivani učinak nije jasno definisan ili je visoko ocenjen	fokus na upravljanju dobavljača usluga putem efikasnog nadgledanja i definisanih pokazatelja učinka
informacioni sistemi / sistemi upravljanja	zametni ručni sistemi sa ograničenim pristupom računarima	na raspolaganju su sistemi administracije ugovora na bazi informacionih tehnologija i sistemi finansijske kontrole	elektronsko izveštavanje i komunikacije sa integrisanim sistemima i široko korišćenje interneta
mehanizmi finansiranja	zavisnost od godišnje raspodele sredstava koje dodeljuje država	budžetska izdvajanja delimično podržavaju dokazi zasnovani na učinku	adekvatno i stabilno finansiranje iz namenskog izvora sredstava vlade i putnih fondova

Table 5. Characteristics of road management organizations [6]

	traditional	mixed (transitional)	modern
regulatory context	regulation of multiple processes and units	performance impeded by conflicting roles and responsibilities	coordinated regulations which promote high degree of transparency and management of key outcomes
structural characteristics	large size with operations performed by public works forces having centralized control and minimal delegation	smaller size with increased outsourcing of functions	focus on results by small work force which leverages competitive forces for cost and quality control
core services (planning, design, construction, maintenance)	focus on technical and functional areas rather than long term strategy and effectiveness	expected performance not clearly defined or highly valued	focus on management of service providers with effective supervision and defined performance targets
information/management systems	cumbersome manual systems with limited access to computers	information technology based contract administration and financial control systems in place	electronic reporting and communications with integrated systems and extensive use of Internet
financing mechanisms	dependence on annual allocation of government assigned funds	budgetary allocations are partially supported by performance based evidence	adequate and stable funding from dedicated source of government and road user funds

Osoblje gradske uprave obavlja svoju funkciju sa značajnom efektivnošću, ali srazmerno niska moć srpske, kao i lokalne privrede ih sprečava da drže korak s tehnološkim dostignućima. Prelazak kvalifikovanog osoblja u privatni sektor ili u druge gradove (ili čak države) smanjuje njihov kapacitet. Sadašnji nivo plata (ograničeni nivoi plaćanja za zaposlene u javnim službama) nije dovoljan da privuče dobre talente, a posebno da zadrži iskusne radike na tržištu gde osoblje sa odgovarajućim nivoom veština i iskustva može da pronađe bolje plaćene pozicije u privatnom sektoru i/ili

City Administration staff carries out their functions with the significant effectiveness, but comparably low power of the Serbian, as well as local economy has prevented them from keeping pace with technological advances. The migration of qualified staff to private sector or to other cities (or even other countries) reduces their capacity. Present level of salaries (restricted payment levels for public service employees) is insufficient to attract good talent and especially to retain the experienced ones in a market where personnel with the appropriate levels of skill and experience are able to

inostranstvu. Ovo je dodatno ugroženo uredbom Vlade RS o ograničenju zapošljavanja u javnom sektoru i ograničenjem broja zaposlenih u javnim institucijama.

U ovom trenutku, postoji ograničeno postojanje odgovarajuće kvalifikovanog i posvećenog osoblja u gradskoj upravi za realizaciju PBMC-a. Oni imaju ograničeno literaturno znanje o PBM ugovaranju bez praktičnog iskustva. Osim toga, ne postoji dostupnost potrebnih tehničkih i tehnoloških sredstava za snimanje mreže, ocenu kvaliteta izvedenih radova i praćenje PBMC. Gradska uprava je poznata s nacionalnim procedurama nabavke, s veoma ograničenim iskustvom u postupcima međunarodnih finansijskih institucija.

Gradskoj upravi će biti potreban neki element obuke i tehničke pomoći u razvoju PBMC-a, a potom i kontrole i odobravanja radova tokom početne realizacije.

Imajući u vidu specifičnu praksu upravljanja ulicama i putevima u Gradu Kragujevcu, preporučuje se uspostavljanje male jedinice za upravljanje nadzor PBM. Ova jedinica može se uspostaviti u gradskoj upravi za komunalne i inspekcijske poslove zbog sledećeg: (i) preporučeni pristup je da se realizuje PBMC za ulice unutar granica GUP-a i (ii) ova uprava već ima opšti kapacitet da prati radove održavanja.

Glavni zadaci jedinice biće:

- priprema PBMC;
- upravljanje i nadgledanje PBM radova;
- priprema i praćenje planova i programa;
- priprema kriterijuma za dodelu finansijskih sredstava;
- organizacija i sprovođenje tehničke kontrole za radove na održavanju;
- priprema predloga za ugovaranje radova na održavanju;
- priprema materijala i predlog odluka za rukovodioce uprave u njihovom domenu rada;
- priprema odluka iz područja odgovornosti;
- saradnja s drugim jedinicama i/ili odeljenjima;
- druge dužnosti u okviru sopstvene odgovornosti;

Tim inicijalno treba da bude sastavljen od četiri stalna člana (šef jedinice, dva terenska nadzornika i tehnički administrator). Predviđeno je da jedinici u početnoj fazi neće biti potrebna nikakva specijalizovana tehnička oprema. Postoji samo potreba za snabdevanjem osoblja s nekoliko personalnih računara, štampača i tableta (za terenski rad), kao i terenske nadzornike sa dva putnička automobila. Računari i tableti treba da budu isporučeni sa odgovarajućim programima. Procenjeni iznos za pomenutu opremu i vozila iznosi oko 60.000 evra.

Iako vlasti u Gradu Kragujevcu već imaju iskustvo u aktivnostima održavanja puteva i nadzoru radova i usluga, u prošlosti nije bilo iskustva s PBM ugovorima. Predviđa se to da će gradskoj upravi biti potrebni neki elementi pomoći i obuke tokom inicijalne implementacije PBM ugovora za razvoj, upravljanje, implementaciju i nadzor PBMC.

Ova pomoć može da bude u obliku kompletnog konsultantskog ugovora ili korišćenjem pojedinačnog iskusnog savetnika. Mnogo će zavisiti od nivoa i kvaliteta kadrova koji su na raspolaganju u gradskoj upravi. Pored

find better paid positions in the private sector and/or abroad. This is further jeopardized with the RS Government Decree on the Limitation of Employment in the Public Sector and by the limitation of the number of employees in public institutions.

At the moment there is limited existence of appropriately qualified and dedicated staff within City Administration for implementation of PBMCs. They hold limited literature knowledge about PBM contracting, without any practical experience. Furthermore, there is no availability of requisite technical and technological means to survey network, assess quality of performed works and monitor PBMCs. City Administration is familiar with national procurement procedures, with very limited experience in IFIs' procedures.

City Administration will require some element of training and technical assistance in the development of PBMCs and subsequently in the control and certification of the works during initial implementation.

Taking into consideration specific practice of streets and roads network management at the City of Kragujevac, it is recommended to establish basic PBM Management and Monitoring Unit. This unit may be established at the City Administration for Communal and Inspection Affairs because: (i) the recommended approach is to implement the PBMC for streets within the GUP boundaries and (ii) this Administration already possess general capacity to monitor maintenance works.

Main tasks of the unit shall be:

- preparation of PBMC;
- management and monitoring of PBM works;
- preparation and follow up of plans and programs;
- preparation of criteria for allocation of financial resources;
- organization and performance of technical control for maintenance works;
- preparation of proposals for contracting maintenance works;
- preparation of materials and decision proposals for the Head of City Administration in the field of work;
- preparation of decisions from the field of responsibilities;
- cooperation with other units and/or departments;
- other duties from the field of responsibility.

The team should initially consist of four permanent members (Head of Unit, two Field Supervisors and Technical Administrator). It is foreseen that the unit would not require any specialized technical equipment at the initial phase. There is only a need to supply staff with several personal computers, printers and tablets (for field work), as well as Field Supervisors with two passenger cars. Computers and tablets should be supplied with relevant software. Estimated amount for the above mentioned equipment and vehicles is approximately EUR 60.000.

Although the authorities in the City of Kragujevac already have experience in road maintenance activities and related supervision of works and services, there has been no experience with PBM contracting in the past. It is envisaged that City Administration would require some element of assistance and training during the initial implementation of PBM contracting for development, managing implementation and monitoring PBMCs.

This assistance may take the form of a full-fledged consultancy agreement or may be accomplished through

dobre saradnje s nadležnim organima Grada Kragujevca, konsultant za tehničku pomoć treba da obezbedi i radionicu za zainteresovano osoblje izvođača radova iz javnog i privatnog sektora koji se bave pitanjima održavanja puteva u vezi s pripremom konkurentnih ponuda za PBM radove i upravljanje PBMC-om, koji pokrivaju i redovno i zimsko održavanje.

## 7 ZAKLJUČAK

Uvođenje PBMC u putarsko poslovanje obično je izazovan zadatak, jer – kao i u slučaju većine novih koncepata – PBMC će verovatno na početku kritikovati oni koji su navikli na stare načine „klasičnih“ ugovora o održavanju puteva i na koncept izvođača radova angažovanog putem „radnih naloga“, te plaćenim prema količinama izvršenim tokom aktivnosti održavanja puteva.

U stvarnom svetu, najveći problem prilikom uvođenja novih vrsta ugovora o održavanju puteva (kao što je PBMC) predstavljaju prepreke koje uzrokuju stalne probleme većini aktera – težnja ka stvarnim promenama u kulturi održavanja puta, kao i u mentalitetu svih uključenih aktera, te postepena realizacija novih ugovora.

Rezultati studije pružaju vlastima u Kragujevcu mogućnosti za poboljšanje kapaciteta za upravljanje putnom mrežom u gradu i za efektivno i efikasno obavljanje radova na održavanju puteva.

PBMC koncept pokazao se uspešnim u drugim zemljama i regijama, tako da može biti uspešan i u Kragujevcu. Preporučuje se da jedan pilot-projekat bude realizovan, s ciljem da PBMC postane norma ako taj pilot-projekat pokaže smanjenje troškova i/ili poboljšanu troškovnu efikasnost.

## ZAHVALNICA

Predmet ovog rada deo je šire studije pod nazivom „Rehabilitacija ulica u Kragujevcu / Upravljanje i održavanje puteva na osnovu merenja učinka“, koja je deo „Projekta unapređenja infrastrukture Kragujevca“. Autor zahvaljuje svim organima na saradnji i razumevanju.

the use of a single, experienced advisor. Much will depend on the level and quality of staffing available at the City Administration. Apart from close liaison with the authorities of the City of Kragujevac, technical assistance consultant should also provide workshop for the interested contractors' staff from the public and private sector dealing with the road maintenance issues providing instructions about the preparation of competitive bids in PBM works and management of PBMCs, covering both routine and winter maintenance.

## 7 CONCLUSION

Introduction of PBMC in the road business is usually a challenging task since, as with most of new concepts, PBMC will probably be subject to critics at the beginning by those who are used to the old ways of “classical” road maintenance contracts and the concept of contractors engaged through “work orders”, and being paid against quantities executed during road maintenance operations.

In the real world, the biggest problem during the introduction of new types of road maintenance contracts (like PBMC) is the obstacle that causes continuous troubles to most of the actors involved - it requires real changes in road maintenance culture and mentality of all actors involved and gradual implementation of new contracts.

The results of the study provide the authorities at the City of Kragujevac with options to improve its capacity to manage the road network within the City and to carry out road maintenance works effectively and efficiently.

PBMCs proved to be successful in other countries and regions, and may also prove as successful in Kragujevac. It is recommended to implement one pilot project with an idea to make PBMCs the norm if the pilot project demonstrates cost savings and/or improved cost-effectiveness.

## ACKNOWLEDGEMENT

The work reported in this paper has been conducted as a part of a wider study “Kragujevac Street Rehabilitation/Performance-based Management and Maintenance of Roads” as a part of the “Kragujevac Infrastructure Upgrade Project”. Author extends his thanks to all authorities for their kind assistance and understanding.

## 8 LITERATURA REFERENCES

- [1] Engelke, T., Long term performance based road maintenance contracts in Western Australia, Bay Roads Exposed Conference, Rotorua, 2003.
- [2] Stankevich, N., Quereshi, N., Queiroz, C., Performance-Based Contracting for Preservation and Improvement of Road Assets, Transport Note No. TN-27, The World Bank, 2005 (updated 2009).
- [3] Gericke, B., Henning, T., Greenwood, I., Review of Performance Based Contracting in the Road Sector-Phase 1, Transport Paper No. 42A, The World Bank, 2014.
- [4] Performance Based Contracting for Roads-Policy Dialogue Event, Policy Paper, Roughton International Ltd., United Kingdom, 2016.
- [5] Radović, N., Mirković, K., Šešlija, M., Peško, I., Output and Performance Based Road Maintenance Contracting-Case Study Serbia, Technical Gazette, Vol. 21, No. 3, 2014, p. 681–688.
- [6] PBMC Options for Future Maintenance of Roads in the city of Kragujevac, Arup d.o.o. Beograd, 2016.
- [7] Grad Kragujevac, zvanična internet prezentacija, [www.kragujevac.rs](http://www.kragujevac.rs) (pristup 13.08.2017).
- [8] Strategija održivog razvoja Kragujevca 2013–2018, „Službeni list Grada Kragujevca”, broj 13/2013.
- [9] Strategija razvoja saobraćaja grada Kragujevca 2012–2022, 2012.
- [10] Odluka o gradskim upravama grada Kragujevca, „Službeni list Grada Kragujevca”, broj 25/2015.
- [11] Odluka o ulicama, lokalnim i nekategorizovanim putevima, „Službeni list Grada Kragujevca”, broj 18/2014.
- [12] Zakon o komunalnim delatnostima, „Službeni glasnik Republike Srbije”, broj 88/2011.
- [13] Zakon o javnim nabavkama, „Službeni glasnik Republike Srbije”, br. 124/2012, 14/2015 i 68/2015.
- [14] Odluka o određivanju i načinu poveravanja komunalnih usluga, „Službeni list Grada Kragujevca”, br. 20/2005, 1/2007, 2/2007, 5/2008 i 8/2010.
- [15] Odluka o utvrđivanju komunalnih usluga koje se finansiraju iz budžeta grada i za koje seugovori dodeljuju na osnovu Zakona o javnim nabavkama, „Službeni list Grada Kragujevca”, br. 2/2006.
- [16] Odluka o utvrđivanju sektora komunalnih delatnosti i komunalnih delatnosti koje mogu izvoditi isključivo javna komunalna preduzeća u gradu Kragujevcu, br. 352-1270/13-V od 27.12.2013. i br. 352-14/14-V od 16.01.2014.
- [17] Odluka o komunalnim uslugama na teritoriji grada Kragujevca, „Službeni list Grada Kragujevca”, br. 30/2014.
- [18] Generalni urbanistički plan, prva izmena i dopuna, „Službeni list Grada Kragujevca”, br. 16/2012
- [19] Uredba o kriterijumima za utvrđivanje prirode troškova, uslova i odredbi za dobijanje dozvole za zaključivanje posebnih sporazuma koji po prirodi izdataka zahtevaju plaćanje tokom nekoliko godina, „Službeni glasnik Republike Srbije”, broj 21/2014.

## REZIME

### OCENA I POBOLJŠANJE ODRŽAVANJA GRADSKIH ULICA: STUDIJA SLUČAJA KRAGUJEVAC

Igor JOKANOVIĆ

Grad Kragujevac bori se s pružanjem usluga održavanja puteva zbog ograničenih sredstava i malih kapaciteta unutar postojećih javnih komunalnih preduzeća. Kako bi rešile probleme s tradicionalnim metodama ugovaranja, mnoge agencije za puteve prešle su na ugovaranje radova na održavanju puteva s privatnim sektorom, na osnovu merenja učinka. U radu su prikazani rezultati studije sprovedene radi poboljšanja postojeće prakse i stanja urbane mreže u gradu Kragujevcu, primenom ugovora o održavanju zasnovanom na učinku.

**Ključne reči:** gradske ulice, održavanje, upravljanje, ugovaranje zasnovano na učinku, procena, poboljšanje, izvođač radova, kapacitet

## SUMMARY

### ASSESSMENT AND IMPROVEMENT OF URBAN STREETS MAINTENANCE: CASE STUDY KRAGUJEVAC

Igor JOKANOVIĆ

City of Kragujevac struggles with providing road maintenance services due to limited funds and low capacity within the existing Public Utility Companies. As a solution to problems with traditional methods of contracting, many road authorities have moved to contracting road maintenance works to the private sector based on performance measures. The paper presents the outcomes of the study conducted for the purpose of improving current practice and condition of urban network within the City of Kragujevac through the application of performance-based maintenance contracting.

**Key words:** urban streets, maintenance, management, performance-based contracting, assessment, improvement, contractor, capacity



# ANALIZA ŠIRINE PUKOTINA GREDA OD MIKROARMIRANOG BETONA SA ČELIČNIM VLAKNIMA

## CRACK WIDTH ANALYSIS OF STEEL FIBERS REINFORCED CONCRETE BEAMS

Merima ŠAHINAGIĆ–ISOVIĆ  
Marko ČEČEZ

ORIGINALNI NAUČNI RAD  
ORIGINAL SCIENTIFIC PAPER  
UDK: 624.012.4:072.2:620.172.24  
doi:10.5937/GRMK1704053S

### 1 UVOD

Radi poboljšanja svojstava betonskih elemenata i konstrukcija, sprovedena su brojna istraživanja s dodacima organskih i neorganskih vlakana betonskim mješavinama. Sa ovim dodacima, poboljšana su svojstva kao što su čvrstoća pri zatezanju, čvrstoća pri savijanju, žilavost, dinamička čvrstoća i tako dalje. U posljednje vrijeme, beton ojačan vlaknima (Fiber Reinforced Concrete – FRC) ima široku primjenu kod različitih konstrukcija i konstruktivnih elemenata kao što su: tunelske cijevi, prefabrikovani segmenti, prskani beton, industrijski podovi, željeznički pragovi i tako dalje. Jedna od najpopularnijih vlakana u upotrebi jesu čelična vlakna, te se takav beton zove beton ojačan čeličnim vlaknima (Steel Fiber Reinforced Concrete – SFRC). Dodavajući čelična vlakna mješavini betona, svojstva betonskih elemenata prije stvaranja pukotina neće se bitno mijenjati, ali se vrlo mijenja postpukotinsko ponašanje takvih elemenata [7].

U slučaju krutih materijala kao što je beton, pukotine se javljaju za relativno niske vrijednosti opterećenja (savijanje). Ovo se može objasniti činjenicom da kruti materijali imaju veoma nisku mogućnost apsorbovanja energije, što je rezultat malih deformacija koje mogu podnijeti [2]. Prisustvo čeličnih vlakana poboljšava apsorpciju totalne energije, gdje vlakna apsorbuju energiju deformisanjem i čupanjem.

### 1 INTRODUCTION

In order to improve the properties of concrete elements and constructions, numerous studies have been carried out with the addition of organic and inorganic fibers to concrete mixtures. With these additions properties such as tensile strength, flexural strength, toughness, dynamic strength etc. have been improved. Recently, Fiber Reinforced Concrete (FRC) is widely used in various constructions and constructive elements such as: tunnel linings, prefabricated segments, shotcrete, industrial floors, railway sleepers and so on. One of the most popular fibers are steel fibers, and such concrete is called Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC). By adding steel fibers to a concrete mixture, the properties of concrete elements before cracking will change insignificantly, but the post-cracking behaviour of such elements considerably changes [7].

For brittle materials such as concrete, cracks occur for relatively low loading values (bending). This can be explained by the fact that brittle materials have very low ability to absorb energy, which is the result of small deformations that they can bear [2]. The presence of steel fibers improves the absorption of total energy, where the fibers absorb energy by deforming and pulling out.

---

Van. prof.dr sc. Merima Šahinagić–Isović, d.i.g., Univerzitet „Džemal Bijedić“ u Mostaru, Građevinski fakultet, Univerzitetski kampus, 88000 Mostar, Bosna i Hercegovina, e-mail: [merima.sahinagic@unmo.ba](mailto:merima.sahinagic@unmo.ba)  
Viši ass.mr. Marko Čečez, d.i.g., Univerzitet „Džemal Bijedić“ u Mostaru, Građevinski fakultet, Univerzitetski kampus, 88000 Mostar, Bosna i Hercegovina, e-mail: [marko.cecez@unmo.ba](mailto:marko.cecez@unmo.ba)

---

Asoc.prof. PhD, Merima Sahinagic-Isovic, CE, University "Džemal Bijedić" of Mostar, Faculty of Civil Engineering, University campus, 88000 Mostar, Bosnia and Herzegovina, e-mail: [merima.sahinagic@unmo.ba](mailto:merima.sahinagic@unmo.ba)  
Senior ass.mr. Marko Cecez, CE, University "Džemal Bijedić" of Mostar, Faculty of Civil Engineering, University campus, 88000 Mostar, Bosnia and Herzegovina, e-mail: [marko.cecez@unmo.ba](mailto:marko.cecez@unmo.ba)

Očigledno, pojava pukotina je neminovna. Čelična vlakna ne mogu spriječiti formiranje pukotina, ali mogu ih smanjiti [15]. Studije pokazuju da postoji veliki uticaj dodatka čeličnih vlakana mješavini na širinu pukotina kod betonskih elemenata. Smanjenje širine pukotina ovisi o tipu i vrsti čeličnog vlakna, te o količini (procentu) vlakana u mješavini. Ali čak i u slučaju malog procenta čeličnih vlakana, primijećeno je smanjenje širine pukotina betonskog elementa [17,7].

Klepša i dr. [10] ispitivali su širinu i razmak pukotina kod greda od običnog betona i betona s dodatkom 30 kg/m<sup>3</sup> čeličnih vlakana. Nakon pojave velikih pukotina, registrirano je povećanje širine pukotina kod greda bez vlakana u poređenju s gredama s vlaknima za oko deset puta. Šalna i Marčiukaitis [16] sproveli su istraživanje uticaja čeličnih vlakana kod betonskih greda s različitim rasponima. Grede su sadržavale 1.0, 1.5 i 2.0% čeličnih vlakana i pokazano je da grede sa 2.0% čeličnih vlakana imaju skoro tri puta manju širinu pukotina nego grede sa 1.0% vlakana za prosječno opterećenje. Nadalje, pokazano je da se grede sa 2.0% čeličnih vlakana imaju 32% veću silu pri lomu nego grede sa 1.0% čeličnih vlakana. Vasanelli i dr. [17] istraživali su uticaj vrste i količine vlakana na širinu pukotina armirano-betonskih greda. Grede koje su sadržavale 0.6% čeličnih vlakana za karakterističnu silu pokazale su 42% manju vrijednost širine pukotina od greda bez vlakana. Dupont i Vandewalle [7] ispitivali su uticaj dodatka čeličnih vlakana različitih količina i profila glavne armature na širinu pukotina armirano-betonskih greda. Pokazano je da se povećanjem količine čeličnih vlakana – širina pukotina smanjuje, a rezultati su izražajniiji za manje profile glavne armature, što je i očekivano. Prosječno smanjenje širine pukotina za grede s maksimalnom količinom vlakana od 60 kg/m<sup>3</sup> za srednje vrijednosti momenata savijanja jeste oko 70% u odnosu na grede bez vlakana. Ispitivanja širine pukotina još uvijek predstavljaju predmet interesa istraživača, pošto njihovo ponašanje u betonskim elementima još uvijek nije u potpunosti istraženo [5, 9].

U ovom radu predstavljeni su rezultati i analiza eksperimentalnog istraživanja širine i formiranja pukotina kod betonskih greda sa čeličnim vlaknima. Proračun graničnog stanja pukotina (raspucavanja) ima zadaću da ograniči širinu pukotina betonskih elemenata, radi sprječavanja propadanja betonskih konstrukcija, koje je veoma često rezultat korozije uslijed curenja tečnosti i gasova kroz široke pukotine betonskih elemenata. Analiziran je uticaj dodatka čeličnih vlakana na širinu pukotina armiranih betonskih greda opterećenih do loma kratkotrajnim ultimnim statičkim opterećenjem s jednim ciklusom rasterećenja. Grede su izrađene od dvije vrste betona: betona obične čvrstoće (OSC) – C30/37 i betona visoke čvrstoće (HSC) – C60/70, sa 0,45% čeličnih vlakana i bez njih.

## 2 EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE

### 2.1 Materijali

U eksperimentalnom istraživanju korištene su dvije vrste betona – beton obične čvrstoće (OSC) – C30/37 i beton visoke čvrstoće (HSC) – C60/70 (tabela 1). Obe vrste betona spravljane su sa 0,45% čeličnih vlakana i bez njih. Korištena čelična vlakna su tipa IRI 50/30

Obviously, the crack appearance is inevitable. Steel fibers cannot prevent the crack formation, but they can reduce it. Studies show that there is a high influence of steel fiber addition to a concrete mixture to the crack width in concrete elements. Crack width reduction depends on the type of steel fibers and quantity (percentage) in mixture. But even with a small percentage of steel fibers, the crack width reduction was noticed [17, 7].

Klepša et al. [10] investigated the crack width and spacing for beams of ordinary concrete and concrete with the addition of 30 kg/m<sup>3</sup> of steel fibers. After the appearance of large cracks, the crack width for beams of ordinary concrete were increased about ten times. Šalna and Marčiukaitis [16] conducted the study of influence of steel fibers for concrete beams with different spans. The beams consisted of 1.0, 1.5 and 2.0% of steel fibers and it has been shown that beams with 2.0% steel fibers have almost 3 times lower crack width compared to beams with 1.0% fibers for average load. Furthermore, it has been shown that beams with 2.0% steel fibers have 32% greater load capacity compared to beams with 1.0% steel fibers. Vasanelli et al. [17] investigated the influence of the fiber type and quantity on the crack width of reinforced concrete beams. Beams containing 0.6% of steel fibers showed 42% less cracks width compared to beams without fibers for characteristic force. Dupont and Vandewalle [7] investigated the effect of the steel fibers addition of different quantities and main reinforcement profiles to the crack width of reinforced concrete beams. It has been shown that by increasing the amount of steel fibers the crack width is reduced, and the results are more pronounced for smaller profiles of the main reinforcement, as expected. The average reduction of the crack width for beams with a maximum of 60 kg/m<sup>3</sup> of fibers for the mean values of bending moments is about 70% compared to the beams without fibers. Crack width analysis is still in focus of research, as the behaviour of concrete elements is insufficiently explored [5, 9].

In this paper the experimental results and analysis of crack width and crack formation in concrete beams with steel fibers are presented. Calculation of crack ultimate limit state (cracking) has the purpose to limit the crack width of concrete elements, with the aim to prevent deterioration of concrete structures, which is often a result of corrosion due to the flow of liquids and gases through large cracks in concrete elements. The effect of the steel fibers addition to the crack width of reinforced concrete beams loaded with a short-term ultimate static load with a single unload cycle was analysed. The beams were made of two types of concrete: ordinary strength concrete (OSC) – C30/37 and high strength concrete (HSC) – C60/70, with and without 0.45% of steel fibers.

## 2 EXPERIMENTAL RESEARCH

### 2.1 Materials

In the experimental research two types of concrete were used: ordinary strength concrete (OSC) – C30/37 and high strength concrete (HSC) – C60/70 (table 1). Both types were made with and without 0.45% of steel fibers. Used steel fibers were type IRI 50/30 (VJ2),



(VJ2), dužine 30 mm i prečnika 0,50 mm, čvrstoće pri zatezanju 900 MPa. Tako da se u konačnici razmatraju četiri vrste betona: kontrolna mješavina običnog betona bez vlakana OSC, mješavina običnog betona sa čeličnim vlaknima FROSC, kontrolna mješavina betona visoke čvrstoće HSC, mješavina betona visoke čvrstoće sa čeličnim vlaknima FRHSC.

length 30 mm and diameter 0.50 mm, with tensile strength of 900 MPa. Therefore, four types of concrete were considered: control mixture of ordinary concrete without fibers OSC, mixture of ordinary concrete with steel fibers FROSC, control mixture of high strength concrete without fibers HSC, mixture of high strength concrete with steel fibers FRHSC.

Tabela 1. Sastav betona obične i betona visoke čvrstoće  
Table 1. Mixtures of ordinary and high strength concrete

	<b>C30/37</b>	<b>C60/75</b>
Cement / Cement	360 kg/m <sup>3</sup> ; CEM I 42,5 R	414 kg/m <sup>3</sup> ; CEM I 42,5 R
Voda / Water	210 kg/m <sup>3</sup>	158 kg/m <sup>3</sup>
v/c odnos / w/c ratio	0,58	0,36
Agregat / Aggregate	1850 kg/m <sup>3</sup>	1870 kg/m <sup>3</sup>
I frakcija I fraction (0/4)	740 kg/m <sup>3</sup> (40%); riječni pijesak river sand	691,9 kg/m <sup>3</sup> (37%); riječni pijesak river sand
II frakcija II fraction (4/8)	407 kg/m <sup>3</sup> (22%); drobljenac crushed stone	467,5 kg/m <sup>3</sup> (25%); drobljenac crushed stone
III frakcija III fraction (8/16)	703 kg/m <sup>3</sup> (38%); drobljenac crushed stone	710,6 kg/m <sup>3</sup> (38%); drobljenac crushed stone
Mineralni dodaci Mineral additives	-	36 kg/m <sup>3</sup> ; Silicijska prašina sa 91% SiO <sub>2</sub> , 8% u odnosu na masu cementa od 450kg/m <sup>3</sup> 36 kg/m <sup>3</sup> ; Silica fume with 91% SiO <sub>2</sub> , 8% compared to 450kg/m <sup>3</sup> of cement
Hemijski dodaci Chemical additives	-	5 kg/m <sup>3</sup> ; Superplastifikator, superfluid-21, 1,1% u odnosu na masu cementa od 450kg/m <sup>3</sup> 5 kg/m <sup>3</sup> ; Superplasticizer, superfluid-21, 1,1% compared to 450kg/m <sup>3</sup> of cement

Prethodno su ispitane sledeće fizičko-mehaničke osobine svih mješavina na kontrolnim tijelima: čvrstoća pri pritisku, čvrstoća pri zatezanju cijepanjem, čvrstoća pri zatezanju savijanjem, te modul elastičnosti [13, 14]. Osobine su ispitane pri starosti kontrolnih tijela od t=35-40 dana i t=420-430 dana. Čvrstoća pri pritisku i čvrstoća pri zatezanju cijepanjem ispitane su na uzorcima oblika kocke 15x15 cm. Čvrstoća pri zatezanju savijanjem ispitana je na uzorcima oblika prizme 10x10x40 cm, a modul elastičnosti na uzorcima oblika valjka 15/30 cm. Ispitivanja su sprovedena prema JUS standardima. Srednje vrijednosti rezultata ispitivanja fizičko-mehaničkih osobina prikazane su u tabeli 2.

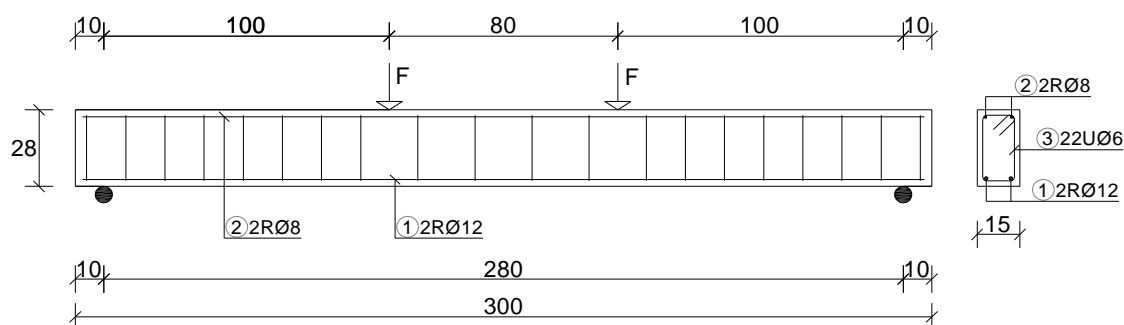
The physical – mechanical properties of all concrete mixtures were previously tested: compressive strength, splitting tensile strength, bending tensile strength and modulus of elasticity [13, 14]. Properties were tested for the concrete age of t=35-40 days and t=420-430 days. Compressive strength and splitting tensile strength were tested on cube samples 15x15 cm. Bending tensile strength was tested on prismatic samples 10x10x40 cm, and modulus of elasticity on cylinder samples 15/30 cm. Tests were conducted according to JUS standards. Average values of test results are presented in table 2.

Tabela 2. Srednja vrijednost rezultata ispitivanja fizičko-mehaničkih osobina  
Table 2. Average value of test results of physical - mechanical properties

Vrsta i starost betona Type and the age of concrete		Osobina / Property			
		Čvrstoća pri pritisku Compressive strength [MPa]	Čvrstoća pri zatezanju cijepanjem Splitting tensile strength [MPa]	Čvrstoća pri zatezanju savijanjem Bending tensile strength [MPa]	Modul elastičnosti Modulus of elasticity [GPa]
OSC	35-40 dana/days	39,70	2,90	5,70	30,5
	420-430 dana/days	43,10	3,50	6,10	33,3
FROSC	35-40 dana/days	32,60	3,40	6,90	29,8
	420-430 dana/days	41,70	3,90	8,30	30,9
HSC	35-40 dana/days	84,40	5,30	9,30	39,5
	420-430 dana/days	95,80	5,40	9,30	41,2
FRHSC	35-40 dana/days	75,60	5,20	9,90	38,9
	420-430 dana/days	88,20	5,40	10,20	39,7

## 2.2 Grede

Ukupno je ispitano šesnaest greda. Sve grede su dimenzija u poprečnom presjeku 15x28 cm i dužine 300 cm (slika 1). Grede su podijeljene u četiri serije: A, F, G, H. Serije A i G jesu grede u slučaju kojih je ispitivano naponsko-deformacijsko stanje betona pri starosti od  $t=35-40$  dana, dok su u slučaju serija F i H ispitivane grede pri starosti  $t=420-430$  dana. Nadalje, sve serije su podijeljene na četiri podgrupe (1, 2, 3, 4), gdje podgrupe 1 i 2 predstavljaju običan beton, a podgrupe 3 i 4 beton visoke čvrstoće. Pregled greda po serijama dat je u tabeli 3. Grede su armirane podužnom armaturom S500 i vilicama klase 240, kako je pokazano na slici 1. Izabrane dimenzije greda i armature (podužna, poprečna i vlakna) odgovaraju primjenama u praksi. Izgled grede prije ispitivanja s mjernim uređajima, kao i način opterećenja prikazani su na slici 2.



Slika 1. Prikaz grede sa armaturom (mjere u cm)  
Figure 1. Display of beam with reinforcement (measures in cm)

Pri ispitivanju greda na kratkotrajno opterećenje do loma s jednim ciklusom rasterećenja, grede su opterećene s dvije koncentrirane sile, na međusobnom rastojanju od 80 cm i na rastojanju od 100 cm od ležišta (slika 1.). Grede su opterećene sa stalnim opterećenjem jedne sile  $F_G=4,00$  kN, koje je konstantno u periodu ispitivanja. Na to opterećenje, dodavano je eksploataciono opterećenje  $F_Q=7,60$  kN. Ukupna sila opterećenja u tom trenutku jeste  $F_{G+Q}=11,6$  kN. Nakon toga, sila je smanjena na vrijednost stalnog opterećenja. Posljednji nivo opterećenja za koje je vršeno očitavanje na svim gredama (ultimno) jeste vrijednost od  $F_U=20,60$  kN, nakon čega se dodavalo opterećenje (sila) u jednakim inkrementima do loma.

## 2.2 Beams

In total 16 beams were tested. All beams are in cross section 15x28 cm and length 300 cm (figure 1). The beams are divided into four series: A, F, G, H. Series A and G are  $t=35-40$  days of age, while F and G series were  $t=420-430$  days. Furthermore, all series are divided into 4 subgroups (1, 2, 3, 4), where subgroups 1 and 2 represent ordinary strength concrete, and subgroups 3 and 4 high strength concrete. The beams' overview is presented in table 3. The beams are reinforced with longitudinal reinforcement S500 and stirrups class 240, as presented in figure 1. The chosen beams dimensions and reinforcement (longitudinal, stirrups and fibers) correspond to the application in practice. The beams layout with measuring devices prior to testing, as well as loading is shown in figure 2.

In the beams test with ultimate short-term load with one unloading cycle, beams were loaded with two concentrated forces at a distance of 80 cm, and 100 cm from bearings (figure 1). The beams are loaded with a constant load with the value of one force  $F_G=4.00$  kN, which is the constant in the test period. On that force, exploitation load was added  $F_Q=7.60$  kN. Total force in that moment is  $F_{G+Q}=11.6$  kN. Last loading level for which measurements were carried out (ultimate) was  $F_U=20.60$  kN, after which the force was added to failure.

Tabela 3. Pregled greda po serijama  
Table 3. Beams' overview per series

Seriya Series	Podgrupa Subgroup	Vrsta betona Concrete type	Seriya Series	Podgrupa Subgroup	Vrsta betona Concrete type	Vrijeme ispitivanja [dani] Testing period [days]
A	A1	OSC	G	G1	FROSC	$t=35-40$
	A2	OSC		G2	FROSC	$t=35-40$
	A3	HSC		G3	FRHSC	$t=35-40$
	A4	HSC		G4	FRHSC	$t=35-40$
F	F1	OSC	H	H1	FROSC	$t=420-430$
	F2	OSC		H2	FROSC	$t=420-430$
	F3	HSC		H3	FRHSC	$t=420-430$
	F4	HSC		H4	FRHSC	$t=420-430$



*Slika 2. Prikaz grede prije ispitivanja s mjernim uređajima i nanošenje opterećenja*  
*Figure 2. Beam prior to the test with measuring devices and loading application*

Širine pukotina mjerene su u sredini grede na tri ili više mjesta – ovisno o pojavi pukotina, sa obe strane grede. Mjerilo se s mikroskopskom lupom tačnosti 0,05 mm. Postupak mjerenja prikazan je na slici 3. Zbog preciznosti, finalno mjerenje rađeno je u programu AutoCAD.

The crack width was measured in the centre of the beams on three or more places on both sides, depending on crack formation. The measurement was performed with a microscope of accuracy of 0.05 mm. The measurement procedure is shown in figure 3. Due to precision, the final measurement was performed in AutoCAD software.



*Slika 3. Postupak mjerenja širine pukotina*  
*Figure 3. Measurement of the crack width*

### 3 REZULTATI I ANALIZA ISTRAŽIVANJA

Širina pukotina i propagacija pukotina mjerene i analizirane su na ukupno šesnaest armirano-betonskih greda, sa 0,45% čeličnih vlakana i bez njih. Ispitan je uticaj čeličnih vlakna i starosti betona na širinu pukotina. U tabeli 4 prikazani su rezultati srednjih vrijednosti izmjerenih širina pukotina s mjernih mjesta za sve podgrupe greda za tri nivoa opterećenja.

### 3 RESEARCH RESULTS AND ANALYSIS

The crack width and crack propagation were measured and analyzed on a total of 16 reinforced concrete beams, with and without 0.45% of steel fibers. The effect of steel fibers and the concrete age on the crack width was investigated. In table 4 average crack width results from measuring points for all subgroups and three loading levels are presented.

Tabela 4. Rezultati srednjih vrijednosti širina pukotina armirano-betonskih greda  
Table 4. The average values of crack width of reinforced concrete beams

Sila / Force [kN]	Širina pukotina / Crack width [mm]				Povećanje / Smanjenje Increase / Decrease [%]
Seriya Series	A				
Podgrupa Subgroup	A1	A2	A3	A4	$(A_{3,4^{av}} - A_{1,2^{av}}) / A_{3,4^{av}}$
$F_{G+Q}=11,60$	0,19	0,15	0,13	0,08	-64
$F_G=4,00$	0,08	0,08	0,07	0,05	-33
$F_U=20,60$	0,45	0,31	0,23	0,23	-66
Seriya Series	F				
Podgrupa Subgroup	F1	F2	F3	F4	$(F_{3,4^{av}} - F_{1,2^{av}}) / F_{3,4^{av}}$
$F_{G+Q}=11,60$	0,16	0,12	0,20	0,08	0,00
$F_G=4,00$	0,12	0,07	0,09	0,04	-38
$F_U=20,60$	0,32	0,18	0,21	0,20	-21
Seriya Series	G				
Podgrupa Subgroup	G1	G2	G3	G4	$(G_{3,4^{av}} - G_{1,2^{av}}) / G_{3,4^{av}}$
$F_{G+Q}=11,60$	0,20	0,07	0,07	0,03	-155
$F_G=4,00$	0,17	0,05	0,04	-	-181
$F_U=20,60$	0,26	0,14	0,14	0,09	-71
Seriya Series	H				
Podgrupa Subgroup	H1	H2	H3	H4	$(H_{3,4^{av}} - H_{1,2^{av}}) / H_{3,4^{av}}$
$F_{G+Q}=11,60$	0,11	0,10	0,08	0,06	-45
$F_G=4,00$	0,07	0,06	0,05	0,04	-53
$F_U=20,60$	0,19	0,23	0,16	0,13	-49

Na gredi G4, prva pukotina pojavila se nakon ciklusa rasterećenja, te je stoga ta greda izuzeta iz daljnje analize. Prikaz razvoja pukotina za jednu karakterističnu armirano-betonsku gredu sa čeličnim vlaknima može se videti na slici 4.

Pri definisanju efekata čeličnih vlakana na širinu pukotina za grede starosti  $t=35-40$  dana, uspoređene su grede serija A i G, a za grede starosti  $t=420-430$  dana, to su grede serija F i H. Prosječna širina pukotina i analiza efekata dodatka vlakana data je u tabelama 5 i 6. Dijagramski prikaz odnosa sila – širina pukotine dat je na slikama 5 i 6.

For beam G4, first crack appeared after the unloading cycle, therefore this beam was excluded from further analysis. Crack development for one characteristic beam is shown in figure 4.

When defining the effects of steel fibers to the crack width for the beams' age  $t=35-40$  days, series A and G were compared, and for the age  $t=420-430$  days that are F and H series. The average crack width and the analysis of the fiber addition effect are given in tables 5 and 6. Diagram of the relation force (F) – crack width (w) is shown on figures 5 and 6.



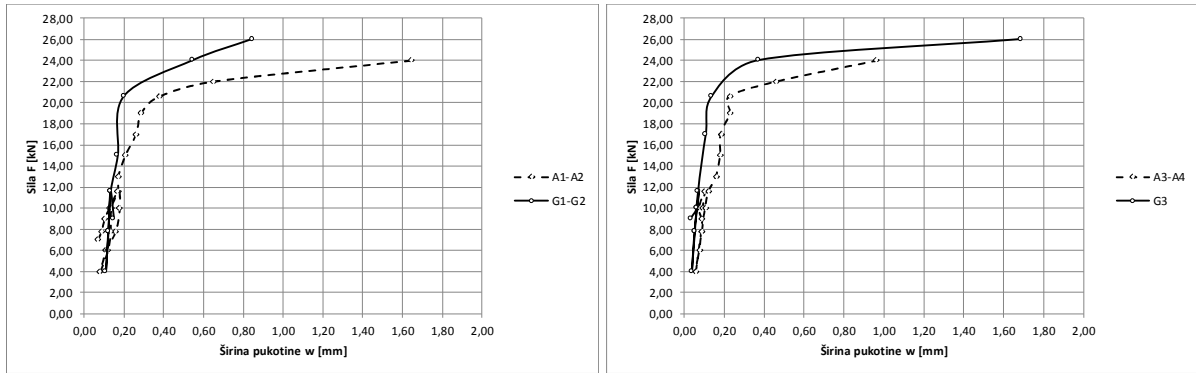
Slika 4. Razvoj pukotina karakteristične armirano-betonske grede sa čeličnim vlaknima  
Figure 4. Crack development for characteristic reinforced beam with steel fibers

Tabela 5. Efekat čeličnih vlakana za grede starosti  $t=35-40$  dana  
Table 5. Steel fibers effect for beams' age  $t=35-40$  days

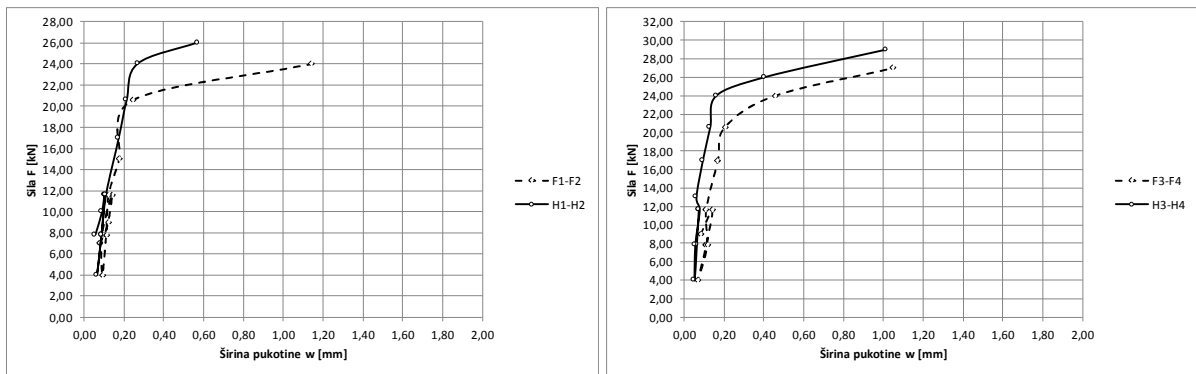
Sila / Force [kN]	A1,2 <sup>av</sup> [mm]	A3,4 <sup>av</sup> [mm]	G1,2 <sup>av</sup> [mm]	G3 [mm]	(G1,2 <sup>av</sup> -A1,2 <sup>av</sup> )/ G1,2 <sup>av</sup> [%]	(G3-A3,4 <sup>av</sup> )/ G3 [%]
F <sub>G+Q</sub> =11,60	0,17	0,10	0,13	0,07	-31	-43
F <sub>G,R</sub> =4,00	0,08	0,06	0,11	0,04	27	-55
F <sub>U</sub> =20,60	0,38	0,23	0,20	0,14	-90	-64

Tabela 6. Efekat čeličnih vlakana za grede starosti  $t=420-430$  dana  
Table 6. Steel fibers effect for beams' age  $t=420-430$  days

Sila / Force [kN]	F1,2 <sup>av</sup> [mm]	F3,4 <sup>av</sup> [mm]	H1,2 <sup>av</sup> [mm]	H3,4 <sup>av</sup> [mm]	(H1,2 <sup>av</sup> -F1,2 <sup>av</sup> )/ H1,2 <sup>av</sup> [%]	(H3,4 <sup>av</sup> -F3,4 <sup>av</sup> )/ H3,4 <sup>av</sup> [%]
F <sub>G+Q</sub> =11,60	0,14	0,14	0,10	0,07	-36	-99
F <sub>G,R</sub> =4,00	0,09	0,07	0,06	0,04	-43	-59
F <sub>U</sub> =20,60	0,25	0,20	0,21	0,14	-16	-43



Slika 5. Dijagrami sila ( $F$ ) – širina pukotine ( $w$ ) za grede serija A i G  
 Figure 5. Diagram force ( $F$ ) – crack width ( $w$ ) for series A and G



Slika 6. Dijagrami sila ( $F$ ) – širina pukotine ( $w$ ) za grede serija F i H  
 Figure 6. Diagram force ( $F$ ) – crack width ( $w$ ) for series F and H

Prema prikazanim rezultatima u tabelama i na slikama, može se zaključiti da dodatak čeličnih vlakana smanjuje širinu pukotina kako kod običnog betona, tako i kod betona visoke čvrstoće. Za nivo eksploatacionog opterećenja prosječne vrijednosti širine pukotina za betonske grede starosti  $t=35-40$  dana, manje su za 31% kod FROSC nego kod OSC, a za ultimno opterećenje ta razlika je 90%. FRHSC grede starosti  $t=35-40$  dana za nivo eksploatacionog opterećenja imaju 43% manje vrijednosti širine pukotina nego HSC grede iste starosti, dok za ultimno opterećenje ta razlika iznosi 64%. Za betonske grede starosti  $t=420-430$  dana primijećeno je nešto drugačije ponašanje. Za nivo eksploatacionog opterećenja širine pukotina FROSC greda su 36% manje u odnosu na OSC, ali za nivo ultimnog opterećenja ta razlika je svega 16%. FRHSC grede imaju znatno smanjenje širine pukotina za nivo eksploatacionog opterećenja u poređenju s HSC gredama od 99%, dok za nivo ultimnog opterećenja razlika je nešto niža – iznosi 43%.

Sa slika 5 i 6 može se vidjeti da je razvoj pukotina OSC i FROSC greda u početku ispitivanja izjednačen; međutim, dostizanjem nivoa ultimnog opterećenja (nešto ispod i iznad  $F_u$  vrijednosti), razlika u razvoju pukotina je očigledna (za obe ispitane starosti betona). Od tog trenutka, FROSC grede imaju mnogo manje širine pukotina od OSC greda. Kod greda starosti  $t=35-40$  dana, približavajući se sili  $F_u$ , razlika širine pukotina

According to the results shown in the tables and in the figures, it can be concluded that the addition of steel fibers reduces the crack width both for ordinary concrete and for high strength concrete. For the exploitation load level average crack width for concrete beams of  $t=35-40$  days age are lower for FROSC compared to OSC for 31%, and for ultimate load level the difference is 90%. FRHSC beams age  $t=35-40$  days for exploitation load level have 43% lower crack width values compared to HSC beams of the same age, while for ultimate load level the difference is 64%. For concrete beams of age  $t=420-430$  days a slightly different behavior was noticed. For exploitation load level average crack width of FROSC beams are 36% lower compared to OSC beams, but for ultimate load level the difference is only 16%. FRHSC beams have significant crack width values reduction for exploitation load level compared to HSC beams of 99%, while for ultimate load level the difference is 43%.

From the figures 5 and 6 it can be seen that crack development for OSC and FROSC beams at the beginning of the test is equal, however by reaching the ultimate load level (slightly below and above  $F_u$ ) the difference in the crack development is obvious (for both concrete age). From that point FROSC beams have significantly lower crack width values compared to OSC beams. For the beams of age  $t=35-40$  days, by approaching the  $F_u$  force, difference in the crack width is

razvija se postepeno, dok se kod gređa starosti  $t=420-430$  dana razlika pojavljuje relativno naglo. Za gređe betona visoke čvrstoće primijećeno je nešto drugačije ponašanje. Od početka eksperimenta, širine pukotina gređa sa čeličnim vlaknima znatno su niže (~50%), a dostizanjem ultimnog nivoa opterećenja, razlika se samo povećava.

Pri definisanju efekata starosti betona na širinu pukotina za gređe sa 0,45% čeličnih vlakana i bez njih, uspoređene su gređe serija A i F, te gređe serija G i H. Prosječna širina pukotina i analiza efekata starosti betona data je u tabelama 7 i 8. Dijagramski prikaz odnosa sila – širina pukotine dat je na slikama 7 i 8.

developing gradually, but for beams of age  $t=420-430$  days the difference occurs relatively rapidly. From the beginning of the experiment crack width are lower for steel reinforced concrete beams (~50%), and by reaching the ultimate load level the difference is only increasing.

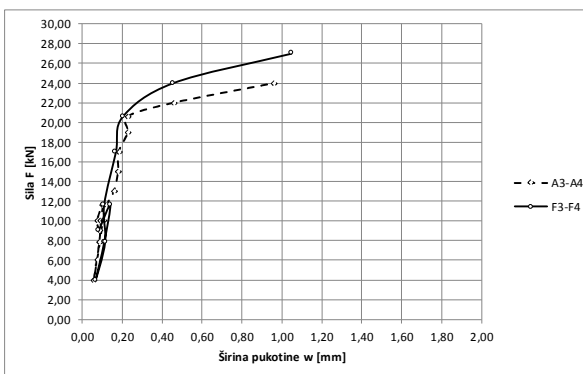
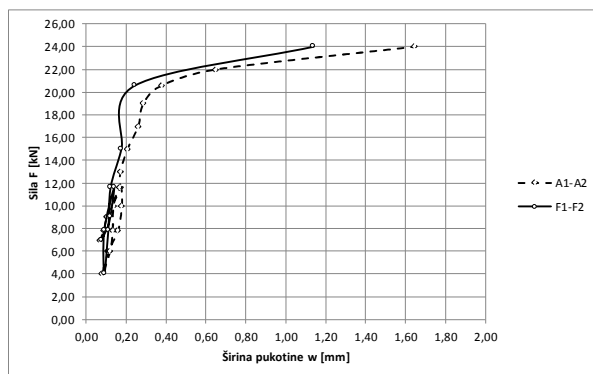
For defining the effect of concrete age to the crack width of concrete beams with and without 0.45% of steel fibers, series A and F, as well as G and H are compared. The average crack width and the analysis of the concrete age effect is given in tables 7 and 8. Diagram of the relation force (F) – crack width (w) is shown on figures 7 and 8.

Tabela 7. Efekat starosti betona za gređe bez čeličnih vlakana  
Table 7. Concrete age effect for the beams without steel fibers

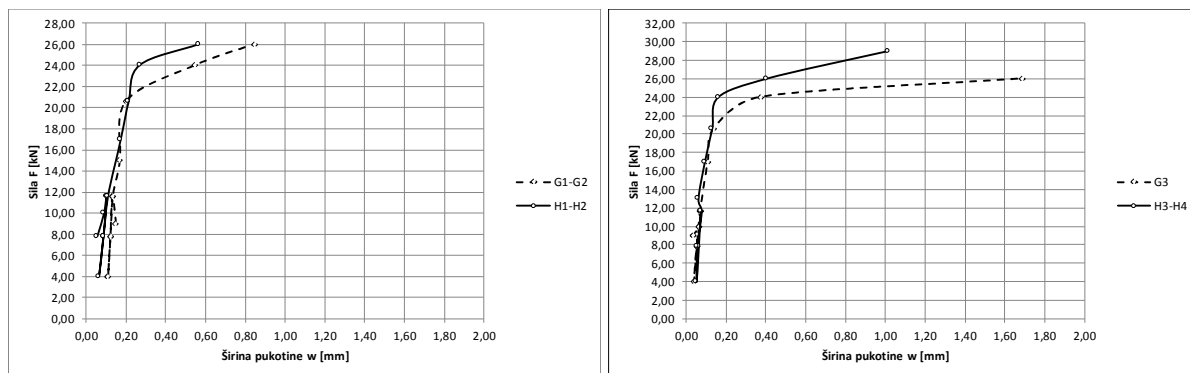
Sila / Force [kN]	A1,2 <sup>av</sup> [mm]	A3,4 <sup>av</sup> [mm]	F1,2 <sup>av</sup> [mm]	F3,4 <sup>av</sup> [mm]	(F1,2 <sup>av</sup> -A1,2 <sup>av</sup> )/F1,2 <sup>av</sup> [%]	(F3,4 <sup>av</sup> -A3,4 <sup>av</sup> )/F3,4 <sup>av</sup> [%]
F <sub>G+Q</sub> =11,60	0,17	0,10	0,14	0,14	-21	26
F <sub>G,R</sub> =4,00	0,08	0,06	0,09	0,07	13	10
F <sub>U</sub> =20,60	0,38	0,23	0,25	0,20	-53	-12

Tabela 8. Efekat starosti betona za gređe sa čeličnim vlaknima  
Table 8. Concrete age effect for the beams with steel fibers

Sila / Force [kN]	G1,2 <sup>av</sup> [mm]	G3 [mm]	H1,2 <sup>av</sup> [mm]	H3,4 <sup>av</sup> [mm]	(H1,2 <sup>av</sup> -G1,2 <sup>av</sup> )/H1,2 <sup>av</sup> [%]	(H3,4 <sup>av</sup> -G3)/H3,4 <sup>av</sup> [%]
F <sub>G+Q</sub> =11,60	0,13	0,07	0,10	0,07	-27	-3
F <sub>G,R</sub> =4,00	0,11	0,04	0,06	0,04	-70	8
F <sub>U</sub> =20,60	0,20	0,14	0,21	0,14	7	3



Slika 7. Dijagrami sila (F) – širina pukotine (w) za gređe serija A i F  
Figure 7. Diagram force (F) – crack width (w) for series A and F



Slika 8. Dijagrami sila ( $F$ ) – širina pukotine ( $w$ ) za grede serija G i H  
Figure 8. Diagram force ( $F$ ) – crack width ( $w$ ) for series G and H

Prosječne vrijednosti širine pukotina OSC greda za nivo eksploatacionog opterećenja manje su za 21% kod greda starosti  $t=420-430$  dana nego kod greda starosti  $t=35-40$  dana, a za nivo ultimnog opterećenja – ta razlika iznosi 53%. U slučaju HSC greda, za nivo eksploatacionog opterećenja grede starosti  $t=420-430$  dana imaju veće prosječne vrijednosti širine pukotina od greda starosti  $t=35-40$  dana i to za 26%, dok porastom sile do nivoa ultimnog opterećenja grede starosti  $t=420-430$  dana imaju manje prosječne vrijednosti širine pukotina u odnosu na grede starosti  $t=35-40$  dana za 12%.

Dodatak čeličnih vlakana u konačnici ne utiče značajno na širinu pukotina betonskih greda s obzirom na njihovu starost. Prosječne vrijednosti širine pukotina FROSC greda za nivo eksploatacionog opterećenja manje su kod greda starosti  $t=420-430$  dana od greda starosti  $t=35-40$  dana za 27%, dok kod FRHSC greda ta razlika iznosi svega 3%. Za nivo ultimnog opterećenja prosječne širine pukotina FROSC greda su 7% veće za grede starosti  $t=420-430$  dana, a kod FRHSC greda ta razlika je 3%.

Sa slika 7 i 8 može se vidjeti da starost betona utiče na širinu pukotina OSC i HSC greda samo nakon dosezanja nivoa ultimnog opterećenja. Primjetne su nešto niže vrijednosti širine pukotina greda starosti  $t=420-430$  dana. Za grede sa čeličnim vlaknima nije primjetna značajnija razlika u toku formiranja pukotina u početku ispitivanja. Prekoračenjem nivoa ultimnog opterećenja, grede starosti  $t=420-430$  dana pokazuju znatno niže vrijednosti širine pukotina.

## 4 PRORAČUN ŠIRINE PUKOTINA

### 4.1 Proračun širine pukotina prema EC2 – EN 1992:2004

U EC2-EN 1992:2004 [8] prikazan je indirektni dokaz proračuna širine pukotina, koji je za svakodnevnu inženjersku praksu zadovoljavajuće tačnosti. Karakteristična širina pukotina računa se kao proizvod razlike između srednje dilatacije u zatežućoj armaturi  $\epsilon_{sm}$ , srednje dilatacije u zategnutom betonu između pukotina  $\epsilon_{cm}$  i maksimalnog razmaka naprsilina  $s_{r,max}$ :

Average crack width values for OSC beams at exploitation load level are lower for the beams of age  $t=420-430$  days compared to the beams of age  $t=35-40$  days for 21%, for ultimate load level the difference is 53%. For HSC beams at exploitation load level beams of age  $t=420-430$  days have greater average crack width values compared to the beams of age  $t=35-40$  days for 26%, while by increasing load level to ultimate beams of age  $t=420-430$  days have lower average crack width values compared to the beams of age  $t=35-40$  days for 12%.

The addition of steel fibers ultimately fails to significantly affect the crack width of reinforced concrete beams due to their age. Average crack width of FROSC beams for exploitation load level are lower for beams of age  $t=420-430$  days compared to beams of age  $t=35-40$  days for 27%, while for FRHSC beams the difference is only 3%. For ultimate load level average crack width of FROSC beams is 7% greater for beams of age  $t=420-430$  days, and for FRHSC beams the difference is 3%.

From the figures 7 and 8 it can be seen that the concrete age affects the crack width of OSC and HSC beams only after reaching the ultimate load level. Slightly lower values of the crack width for concrete age of  $t = 420-430$  days are noticeable. For beams with steel fibers no significant difference was observed in crack formation at the beginning of the test. By exceeding the ultimate load level, beams of age  $t=420-430$  days shows significantly lower values of the cracks width.

## 4 CRACK WIDTH CALCULATION

### 4.1 Crack width calculation according to EC2 – EN 1992:200

In EC2 – EN 1992:2004 [8] indirect method of crack width calculation is presented, which has satisfactory accuracy for everyday engineering practice. Characteristic crack width is calculated as the product of mean dilatation in reinforcement  $\epsilon_{sm}$ , mean dilatation in tensioned concrete  $\epsilon_{cm}$  and maximum crack distance  $s_{r,max}$ :



$$w_k = b \cdot s_{rm} \cdot e_{sm}$$

ili / or

$$w_k = s_{r,max} \cdot (e_{sm} - e_{cm})$$
(1)

gdje je:

$\beta$  – odnos računске i srednje širine pukotina ( $\beta=1,70$  za naprezanje izazvano opterećenjem ili prinudnim deformacijama;  $\beta=1,30$  za naprezanje izazvano prinudnim deformacijama);

$s_{rm}$  – srednji razmak pukotina koji se računa iz izraza (2):

where:

$\beta$  – relation between calculated and average crack width ( $\beta=1,70$  for stress caused by load or forced deformations;  $\beta=1,30$  for stress caused by forced deformations),

$s_{rm}$  – mean crack distance calculated from the expression (2):

$$s_{rm} = 50 + 0,25 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{\Phi_s}{r_{p,eff}}$$
(2)

gdje je:

$\Phi_s$  – prečnik armaturne šipke;  
 $k_1$  – koeficijent kojim se uzima u obzir kvaliteta spoja armature i betona;

$k_2$  – koeficijent koji zavisi od oblika dijagrama dilatacija po visini poprečnog presjeka;

$\rho_{p,eff}$  – efektivni geometrijski stepen podužne armature u odnosu na efektivnu površinu poprečnog presjeka zategnutog betona  $A_{c,eff}$  koji se računa iz izraza (3):

where:

$\Phi_s$  – bar diameter,  
 $k_1$  – coefficient that takes into account the quality of the bond between reinforcement and concrete,

$k_2$  – coefficient that depends on dilatation diagram by the height of the cross section shape,

$\rho_{p,eff}$  – effective reinforcement ratio of longitudinal reinforcement compared to effective cross section area of tensed concrete  $A_{c,eff}$  calculated from the expression (3):

$$r_{p,eff} = \frac{A_s}{A_{c,eff}}$$
(3)

Srednja dilatacija u zategnutoj armaturi  $\epsilon_{sm}$  računa se:

Mean dilatation of tensed reinforcement  $\epsilon_{sm}$  is calculated as:

$$e_{sm} = \frac{s_s}{E_s} \cdot \left[ 1 - b_1 \cdot b_2 \left( \frac{s_{sr}}{s_s} \right)^2 \right]$$
(4)

gdje je

$\sigma_s$  – napon u armaturi na pukotini;  
 $\beta_1$  – koeficijent koji ima u vidu uticaj spoja armature;  
 $\beta_2$  – koeficijent koji ima u vidu uticaj trajanja opterećenja ili ponavljanja opterećenja;

$\sigma_{sr}$  – napon u zategnutoj armaturi izračunat na početku sekcije s pukotinom pod uslovima opterećenja, koja uzrokuju prvu pukotinu;

$E_s$  – Youngov modul elastičnosti za armaturu.

where:

$\sigma_s$  – stress in reinforcement on crack,  
 $\beta_1$  – coefficient that takes into account the reinforcement bond,

$\beta_2$  – coefficient that takes into account the effect of load duration or load repetition,

$\sigma_{sr}$  – stress in tensed reinforcement calculated at the beginning of crack section under load conditions that cause the first crack,

$E_s$  – Youngs' modulus of elasticity for reinforcement.

## 4.2 ACI building code metod

ACI building code 318 [1] za proračun širine pukotina predlaže empirijsku formulu:

$$w = 0.011 \cdot b_b \cdot s_s \cdot \sqrt[3]{d_c \cdot A_c}$$
(5)

gdje je:

$\beta_b$  – odnos udaljenosti do neutralne osi od zategnutog ruba i od težišta glavne armature

$\sigma_s$  – napon u armaturi

$d_c$  – udaljenost od težišta armature do donjeg ruba elementa

$A_e$  – efektivna površina betona.

## 4.2 ACI building code method

ACI building code 318 [1] for crack width calculation suggest empirical formula:

where:

$\beta_b$  – ratio of distance between neutral axis and tension face to distance between neutral axis and reinforcing steel,

$\sigma_s$  – stress in the reinforcement,

$d_c$  – distance between reinforcements' center and lower edge of the element,

$A_e$  – effective concrete area.

### 4.3 Proračun širine pukotina za beton sa čeličnim vlaknima

#### 4.3.1 RILEM TC162-TDF metod

Za proračun širine pukotina za betone sa čeličnim vlaknima, Međunarodni savez laboratorija i eksperata u građevinskim materijalima, sistemima i strukturama (RILEM – fr. Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages) predložio je primjenu metoda prikazanog u EN 1992:2004. Način proračuna, predstavljen u EN 1992:2004, dopunjen je korekcijom formule za proračun srednjeg razmaka pukotina [12]. Nadalje, napon u zategnutoj armaturi treba izračunati imajući u vidu to što će čelična vlakna koja „premošćavaju“ pukotinu preuzeti zaostale zatežuće naponne ( $\sigma_{fb}$ ) uniformno po visini pukotine. Modifikovani izraz za proračun srednjeg razmaka pukotina dat je izrazom:

$$s_m = \left( 50 + 0,25 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{\Phi_s}{r_r} \right) \cdot \left( \frac{50}{L/\Phi} \right) \quad (6)$$

gdje je:

$k_1$  – koeficijent koji uzima u obzir svojstva spoja armature;

$k_2$  – koeficijent koji uzima u obzir formu raspodjele deformacije;

$\rho_r$  – efektivni odnos armature ( $A_{s1}/A_{c,eff}$ );

$\Phi$  – poluprečnik čeličnog vlakna;

$L$  – dužina čeličnog vlakna.

Veliki nedostatak ovog metoda jeste to što se ne uzima u obzir procenat, odnosno količina vlakana koja se ugrađuju u betonski element. Također, određivanje zaostalih napona uslijed dodatka čeličnih vlakana jeste diskutabilno [4].

Sličnu preporuku korekcije metoda EN 1992:2004 dao je Moffatt [6, 11]. Njegov model koriguje formulu za proračun srednjeg razmaka pukotina, ali sa odnosom postpukotinskog zaostalog napona i napona pri nastanku pukotine:

$$s_m = \left( 50 + 0,25 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{\Phi_b}{r_r} \right) \cdot \left( 1 - \frac{f_{res}}{f_{cr}} \right) \quad (7)$$

gdje je:

$f_{res}$  – postpukotinski zaostali napon;

$f_{cr}$  – napon pri nastanku pukotine.

U ovom prijedlogu, određivanje  $f_{res}$  nije u potpunosti jasno definisano bez prethodnih ispitivanja na betonskom elementu bez konvencionalne armature.

#### 4.3.2 ACI building code metod

Za proračun širine pukotina betonskog elementa sa čeličnim vlaknima, ACI Committee 544 [3] predlaže dodavanje zatezne sile koju podnosi mikroarmirani beton. Doprinos vlakana je u konstantnom zateznom naponu  $\sigma_f$  u raspuknutom dijelu elementa:

$$s_f = 0.00772 \cdot \frac{l_f}{d_f} \cdot V_f \cdot F_{be} \quad (8)$$

gdje je:

$l_f$  i  $d_f$  – geometrijske karakteristike vlakna;

$V_f$  – procenat vlakana;

$F_{be}$  – efektivnost veze čeličnih vlakana i betona

### 4.3 Crack width calculation for concrete with steel fibers

#### 4.3.1 RILEM TC162-TDF method

For calculation the crack width of steel fiber reinforced concrete RILEM (fr. Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages – en. International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures) proposed the application of the EN 1992:2004 method. Method of calculation presented in EN 1992:2004 is corrected by supplementing the formula for mean crack distance calculation [12]. Furthermore, stress in the tensile reinforcement should be calculated considering that steel fibers that are "bridging" the crack will take residual tensile stresses ( $\sigma_{fb}$ ) uniformly by the crack height. The modified expression for the mean crack distance is given by:

where:

$k_1$  – coefficient that takes into account bond properties of reinforcement,

$k_2$  – coefficient that takes into account form of deformation distribution,

$\rho_r$  – effective reinforcement ratio ( $A_{s1}/A_{c,eff}$ ),

$\Phi$  – radius of steel fiber,

$L$  – steel fiber length.

The great disadvantage of this method is not taking into consideration the percentage, i.e. the amount of steel fibers embedded in the concrete elements. Also, the determination of residual stress due to the addition of steel fibers is questionable.

Similar correction of EN 1992:2004 method was given by Moffatt [6, 11]. His model is based on correction of mean crack distance formula, but with relation of post-cracking residual stress and stress at crack formation:

where:

$f_{res}$  – post-cracking residual stress,

$f_{cr}$  – stress at crack formation.

In this proposal determination of  $f_{res}$  is partially defined without previous tests on the concrete element without conventional reinforcement.

#### 4.3.2 ACI building code method

Committee 544 [3] suggests adding tensile force which is taken by fiber reinforced concrete for crack width calculation of concrete element with steel fibers. The fiber contribution is in constant tensile stress  $\sigma_f$  in cracked part of the element:

where:

$l_f$  i  $d_f$  – geometrical characteristics of fibers,

$V_f$  – fiber percentage,

$F_{be}$  – effectiveness of bond between steel fibers and

(varira između 1.0 i 1.2, zavisno od osobina vlakna).

## 5 ZAKLJUČAK

Na osnovu prikazanih rezultata istraživanja, te sprovedene analize za posljednji (ultimni) nivo opterećenja nakon jednog ciklusa rasterećenja za koji je vršeno očitavanje na svim gredama, uticaj dodatka čeličnih vlakana na razvoj i širinu pukotina betonskih greda jeste sledeći:

– za grede običnog betona (starost  $t=35-40$  dana), prosječno smanjenje širine pukotina FROSC greda u poređenju sa OSC gredama jeste 90%;

– za grede betona visoke čvrstoće (starost  $t=35-40$  dana), prosječno smanjenje širine pukotina FRHSC greda u poređenju sa HSC gredama jeste 64%;

– za grede običnog betona (starost  $t=420-430$  dana), prosječno smanjenje širine pukotina FROSC greda u poređenju sa OSC gredama jeste 16%;

– za grede betona visoke čvrstoće (starost  $t=420-430$  dana), prosječno smanjenje širine pukotina FRHSC greda u poređenju sa HSC gredama jeste 43%;

Starost betona za grede s dodatkom vlakana ne utiče značajno na smanjenje širine pukotina (od 3% do 7%).

Cilj rada jeste prvenstveno predstaviti eksperimentalne rezultate mjerenih širina pukotina na armirano-betonskim gredama realnih dimenzija (15/28/300 cm), za dvije starosti betona ( $t=35-40$  i  $t=420-430$  dana), o čemu postoji malo registrovanih podataka. Rad upotpunjuje bazu podataka iz predmetne problematike. U radu je data i teorijska osnova za proračun širine pukotina armirano-betonskih greda prema EN 1992:2004 i ACI building code, kao i armirano-betonskih greda s dodatkom čeličnih vlakana za proračun širine pukotina po prijedlogu RILEM TC162-TDF i ACI building code modela.

Data teorijska osnova predstavlja podlogu za buduća istraživanja, radi poređenja izmjerenih širina pukotina dobivenih eksperimentom sa empirijskim obrascima u važećim standardima i preporukama.

Ovim radom otvorena su mnoga pitanja u polju definisanja ponašanja elemenata i konstrukcija od mikroarmiranog betona sa dodatkom čeličnih vlakana tokom vremena, zbog njegove sve češće primjene kao konstruktivnog materijala u inženjerskoj praksi.

## 6 LITERATURA REFERENCES

- [1] ACI Committee 318, Building code requirements for structural concrete (ACI 318-95) and commentary (ACI 318R-95), American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1995, pp. 110.
- [2] Alwan J. M., Naaman A. E. & Hansen W.: Pull-Out Work of Steel Fibers From Cementitious Composites: Analytical Investigation, Cement & Concrete Composites, Vol. 13 (1991), pp. 247-255.
- [3] American Concrete Institute (ACI) Committee 544: Guide for specifying, proportioning, mixing, placing, and finishing steel fibre reinforced concrete, ACI Materials Journal, Vol. 90(1) (1993), pp. 94-101.

concrete (ranging from 1.0 and 1.2 depending on the fiber characteristics).

## 5 CONCLUSION

Based on the results and analysis for final (ultimate) load level after one unloading cycle for which measurement was taken for all the beams, effect of steel fiber addition to crack formation and crack width of concrete beams is as follows:

– For ordinary concrete beams (age  $t=35-40$  days) average crack width reduction of FROSC beams compared to OSC beams is 90%;

– For high strength concrete beams (age  $t=35-40$  days) average crack width reduction of FRHSC beams compared to HSC beams is 64%;

– For ordinary concrete beams (age  $t=420-430$  days) average crack width reduction of FROSC beams compared to OSC beams is 16%;

– For high strength concrete beams (age  $t=420-430$  days) average crack width reduction of FRHSC beams compared to HSC beams is 43%;

The concrete age fails to significantly affect crack width reduction for beams with steel fibers (from 3% to 7%).

The aim of this paper is primarily to present the experimental results of the measured crack width in reinforced concrete beams with real dimensions (15/28/300 cm), for two concrete ages ( $t=35-40$  and  $t=420-430$  days), for which there is a little recorded data. The paper complements the database of the subject matter. Also, theoretic basis for calculating crack width of reinforced concrete beams by EN 1992:2004 and ACI building code method is given, as well as method for calculating crack width of reinforced concrete beams with steel fibers by RILEM TC162-TDF and ACI building code method.

The theoretical basis presented is the foundation for future research with the purpose of comparing the measured crack widths obtained by experiment with empirical formula given in standards and recommendations.

This paper has opened many issues in the field of defining the behavior of elements and constructions of fiber reinforced concrete with steel fibers over time, for the purpose of its increasingly frequent application as a constructive material in engineering practice.

- [4] Barros J.A.O., Cunha V.M.C.F., Ribeiro A.F., Antunes J.A.B.: Post-cracking behaviour of steel fibre reinforced concrete, Materials and Structures, Vol. 38 (2005), pp. 47-56.
- [5] Čečez M.: Granično stanje upotrebljivosti kod mikroarmiranih betona, Univerzitet „Džemal Bijedić“ u Mostaru, Građevinski fakultet, Master rad, 2015.
- [6] Deluce J. R., Lee S. C., and Vecchio F. J.: Crack Model for Steel Fiber-Reinforced Concrete Members Containing Conventional Reinforcement, ACI Structural Journal, Vol. 111, No. 1 (2014), pp. 93 - 102. doi:10.14359.51686433

- [7] Dupont D. and Vandewalle L.: Calculation of crack widths with the  $\sigma$ - $\varepsilon$  method, Proceedings of the RILEM TC 162-TDF workshop: Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete – Background and Experiences, 2003, Bochum, Germany, pp. 119–144.
- [8] EN 1992-1-1:2004 – EVROKOD 2 – PRORAČUN BETONSKIH KONSTRUKCIJA, Deo 1-1: Opšta pravila i pravila za zgrade, prevod na srpski jezik, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2006.
- [9] Hover E., Psomas S. and Eddie C.: Estimating crack widths in steel fibre-reinforced concrete, Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Construction Materials, 2015, Ahead of Print, pp. 1–12 DOI: 10.1680/coma.15.00019
- [10] Kelpša Š., Augonis M., Daukšys M., Augonis A.: Analysis of crack width calculation of steel fibre and ordinary reinforced concrete flexural members, Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering, No. 1 (6) (2014), pp. 50–57. doi.org/10.5755/j01.sace.6.1.6336
- [11] Moffatt, K., „Analyse de Dalles de Pont avec Armature Réduite et Béton de Fibres Metalliques”, MScA thesis, École Polytechnique de Montréal, Montreal, QC, Canada, 2001, pp. 248.
- [12] RILEM TC 162-TDM. Final recommendation of RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete, Materials and Structures, Vol. 36 (262) (2003), pp. 560–567.
- [13] Šahinagić – Isović M., Čećez M.: Analiza mehaničkih osobina običnog betona i betona visoke čvrstoće sa čeličnim vlaknima, 12. međunarodni naučni skup, iNDiS 2012, Novi Sad, Srbija, pp. 305–312, 2012.
- [14] Šahinagić – Isović M., Čećez M.: Analiza statičkog modula elastičnosti običnog betona i betona visoke čvrstoće sa čeličnim vlaknima, 4. Internacionalni naučno-stručni skup, GNP 2012, Žabljak, Crna Gora, pp. 337–345, 2012.
- [15] Šahinagić – Isović M.: Influence of steel fiber reinforcement to the behavior of reinforced concrete beams, University „St. Cyril and Methodius” of Skopje, Civil Engineering faculty, Doctoral thesis, 2010.
- [16] Šalna R. i Marčiukaitis G.: The influence of shear span ratio on load capacity of fibre reinforced concrete elements with various steel fibre volumes, Journal of Civil Engineering and Management, Vol.13 Iss.3 (2007), pp. 209–215. DOI: 10.1080/13923730.2007.9636439
- [17] Vasanelli E., Micelli F., Aiello M.A., Plizzari G.: Crack width prediction of FRC beams in short and long term bending condition, Materials and Structures, Vol. 47 (2014), pp. 39–54. DOI 10.1617/s11527-013-0043-3

## REZIME

### ANALIZA ŠIRINE PUKOTINA GREDA OD MIKRO-ARMIRANOG BETONA SA ČELIČNIM VLAKNIMA

Merima ŠAHINAGIĆ–ISOVIĆ  
Marko ČEĆEZ

Beton armiran vlaknima posljednjih godina je od eksperimentalnog materijala napredovao u dosta upotrebljiv materijal u praksi, zbog svojih pozitivnih osobina kao što su, na primer, povećane čvrstoće pri zatezanju, čvrstoće pri savijanju, žilavosti. Međutim, postoji još dosta nerazjašnjenih pitanja koja su predmeti istraživanja. U radu su prikazani rezultati i analiza ispitivanja širine pukotina greda od armiranog betona sa čeličnim vlaknima. U okviru analize, razmatra se uticaj dodatka čeličnih vlakana na širinu pukotina betonskih greda (dimenzija 15/28/300 cm), koje su opterećene do loma kratkotrajnim ultimnim statičkim opterećenjem s jednim ciklusom rasterećenja. Grede su izrađene od dvije vrste betona: betona obične čvrstoće (OSC) – C30/37 i betona visoke čvrstoće (HSC) – C60/70, sa 0,45% čeličnih vlakana i bez njih. Rezultati upućuju na zaključak da postoji značajan uticaj dodatka vlakana na širinu pukotina, naročito kod betona obične čvrstoće. Na kraju rada, prikazani su empirijski proračuni širine pukotina betonskih elemenata sa čeličnim vlaknima, prema preporukama RILEM – a i ACI building code.

**Ključne riječi:** beton, čelična vlakna, statičko opterećenje, širina pukotina

## SUMMARY

### CRACK WIDTH ANALYSIS OF STEEL FIBERS REINFORCED CONCRETE BEAMS

Merima SAHINAGIĆ–ISOVIĆ  
Marko CECEZ

Fibre reinforced concrete in recent years has grown from experimental material to a practical usable material, due to its positive properties such as increased tensile strength, bending strength, toughness etc. However, still there are many unanswered questions that are the subject of many research. In this paper results and analysis of crack width of concrete beams with steel fibres are presented. This analysis considers influence of steel fibre addition on the crack width of reinforced concrete beams (dimensions 15/28/300 cm) loaded up to fracture during short-term ultimate static load with one unloading cycle. Concrete beams were made of two types of concrete: ordinary strength concrete (OSC) – C30/37 and high strength concrete (HSC) – C60/70, with and without 0.45% of steel fibres. The results indicate that there is a significant influence of fibre addition on crack width, especially for ordinary concrete. At the end, empirical calculations of the concrete elements' crack width with steel fibres according to the recommendations of RILEM and ACI building code are given.

**Key words:** concrete, steel fibres, static load, crack width

## UPUTSTVO AUTORIMA\*

### Prihvatanje radova i vrste priloga

U časopisu Materijali i konstrukcije štampaće se neobjavljeni radovi ili članci i konferencijska saopštenja sa određenim dopunama, iz oblasti građevinarstva i srodnih disciplina (geodezija i arhitektura). Vrste priloga autora i saradnika koji će se štampati su: originalni naučni radovi, prethodna saopštenja, pregledni radovi, stručni radovi, prikazi objekata i iskustava (studija slučaja), kao i diskusije povodom objavljenih radova.

*Originalni naučni rad* je primarni izvor naučnih informacija i novih ideja i saznanja kao rezultat izvornih istraživanja uz primenu adekvatnih naučnih metoda. Dobijeni rezultati se izlažu sažeto, ali tako da poznavalac problema može proceniti rezultate eksperimentalnih ili teorijsko numeričkih analiza, tako da se istraživanje može ponoviti i pri tome dobiti iste ili rezultate u okvirima dopuštenih odstupanja, kako se to u radu navodi.

*Prethodno saopštenje* sadrži prva kratka obaveštenja o rezultatima istraživanja ali bez podrobnih objašnjenja, tj. kraće je od originalnog naučnog rada.

*Pregledni rad* je naučni rad koji prikazuje stanje nauke u određenoj oblasti kao plod analize, kritike i komentara i zaključaka publikovanih radova o kojima se daju svi neophodni podaci pregledno i kritički uključujući i sopstvene radove. Navode se sve bibliografske jedinice korišćene u obradi tematike, kao i radovi koji mogu doprineti rezultatima daljih istraživanja. Ukoliko su bibliografski podaci metodski sistematizovani, ali ne i analizirani i raspravljani, takvi pregledni radovi se klasifikuju kao stručni radovi.

*Stručni rad* predstavlja koristan prilog u kome se iznose poznate spoznaje koje doprinose širenju znanja i prilagođavanja rezultata izvornih istraživanja potrebama teorije i prakse.

*Ostali prilozi* su prikazi objekata, tj. njihove konstrukcije i iskustava-primeri u građenju i primeni različitih materijala (studije slučaja).

Da bi se ubrzao postupak prihvatanja radova za publikovanje, potrebno je da autori uvažavaju Uputstva za pripremu radova koja su navedena u daljem tekstu.

### Uputstva za pripremu rukopisa

Rukopis otkucati jednostrano na listovima A-4 sa marginama od 31 mm (gore i dole) a 20 mm (levo i desno), u Wordu fontom Arial sa 12 pt. Potrebno je uz jednu kopiju svih delova rada i priloga, dostaviti i elektronsku verziju na navedene E-mail adrese, ili na CD-u. Autor je obavezan da čuva jednu kopiju rukopisa kod sebe.

**Od broja 1/2010, prema odluci Upravnog odbora Društva i Redakcionog odbora, radovi sa pozitivnim recenzijama i prihvaćeni za štampu, publikovaće se na srpskom i engleskom jeziku, a za inostrane autore na engleskom (izuzev autora sa govornog područja srpskog i hrvatskog jezika).**

Svaka stranica treba da bude numerisana, a optimalni obim članka na jednom jeziku, je oko 16 stranica (30000 slovnih mesta) uključujući slike, fotografije, tabele i popis literature. Za radove većeg obima potrebna je saglasnost Redakcionog odbora.

\* Uputstvo autorima je modifikovano i treba ga, u pripremi radova, slediti.

## GUIDELINES TO AUTHORS

### Acceptance and types of contributions

The Building Materials and Structures journal will publish unpublished papers, articles and conference reports with modifications in the field of Civil Engineering and similar areas (Geodesy and Architecture). The following types of contributions will be published: original scientific papers, preliminary reports, review papers, professional papers, objects describe / presentations and experiences (case studies), as well as discussions on published papers.

*Original scientific paper* is the primary source of scientific information and new ideas and insights as a result of original research using appropriate scientific methods. The achieved results are presented briefly, but in a way to enable proficient readers to assess the results of experimental or theoretical numerical analyses, so that the research can be repeated and yield with the same or results within the limits of tolerable deviations, as stated in the paper.

*Preliminary report* contains the first short notifications on the results of research but without detailed explanation, i.e. it is shorter than the original scientific paper.

*Review paper* is a scientific work that presents the state of science in a particular area as a result of analysis, review and comments, and conclusions of published papers, on which the necessary data are presented clearly and critically, including the own papers. Any reference units used in the analysis of the topic are indicated, as well as papers that may contribute to the results of further research. If the reference data are methodically systematized, but not analyzed and discussed, such review papers are classified as technical papers.

*Technical paper* is a useful contribution which outlines the known insights that contribute to the dissemination of knowledge and adaptation of the results of original research to the needs of theory and practice.

Other contributions are presentations of objects, i.e. their structures and experiences (examples) in the construction and application of various materials (case studies).

In order to speed up the acceptance of papers for publication, authors need to take into account the Instructions for the preparation of papers which can be found in the text below.

### Instructions for writing manuscripts

The manuscript should be typed one-sided on A-4 sheets with margins of 31 mm (top and bottom) and 20 mm (left and right) in Word, font Arial 12 pt. The entire paper should be submitted also in electronic format to e-mail address provided here, or on CD. The author is obliged to keep one copy of the manuscript.

As of issue 1/2010, in line with the decision of the Management Board of the Society and the Board of Editors, papers with positive reviews, accepted for publication, will be published in Serbian and English, and in English for foreign authors (except for authors coming from the Serbian and Croatian speaking area).

Each page should be numbered, and the optimal length of the paper in one language is about 16 pages (30.000 characters) including pictures, images, tables and references. Larger scale works require the approval of the Board of Editors.

Naslov rada treba sa što manje reči (poželjno osam, a najviše do jedanaeset) da opiše sadržaj članka. U naslovu ne koristiti skraćenice ni formule. U radu se iza naslova daju ime i prezime autora, a titule i zvanja, kao i ime institucije u podnožnoj napomeni. Autor za kontakt daje telefon, adresu elektronske pošte i poštansku adresu.

Uz sažetak (rezime) od oko 150-250 na srpskom i engleskom jeziku daju se ključne reči (do sedam). To je jezgrovit prikaz celog članka i čitaocima omogućuje uvid u njegove bitne elemente.

Rukopis se deli na poglavlja i potpoglavlja uz numeraciju, po hijerarhiji, arapskim brojevima. Svaki rad ima uvod, sadržinu rada sa rezultatima, analizom i zaključcima. Na kraju rada se daje popis literature.

Kod svih dimenzionalnih veličina obavezna je primena međunarodnih SI mernih jedinica.

Formule i jednačine treba pisati pažljivo vodeći računa o indeksima i eksponentima. Autori uz izraze u tekstu definišu simbole redom kako se pojavljuju, ali se može dati i posebna lista simbola u prilogu.

Prilozi (tabele, grafikoni, sheme i fotografije) rade se u crno-beloj tehnici, u formatu koji obezbeđuje da pri smanjenju na razmere za štampu, po širini jedan do dva stupca (8 cm ili 16,5 cm), a po visini najviše 24,5 cm, ostanu jasni i čitljivi, tj. da veličine slova i brojeva budu najmanje 1,5 mm. Originalni crteži treba da budu kvalitetni i u potpunosti pripremljeni za presnimavanje. Mogu biti i dobre, oštre i kontrastne fotokopije. Koristiti fotografije, u crno-beloj tehnici, na kvalitetnoj hartiji sa oštrim konturama, koje omogućuju jasnu reprodukciju.

U popisu literature na kraju rada daju se samo oni radovi koji se pominju u tekstu. Citirane radove treba prikazati po abecednom redu prezimena prvog autora. Literaturu u tekstu označiti arapskim brojevima u uglastim zagradama, kako se navodi i u Popisu citirane literature, napr [1]. Svaki citat u tekstu mora se naći u Popisu citirane literature i obrnuto svaki podatak iz Popisa se mora citirati u tekstu.

U Popisu literature se navode prezime i inicijali imena autora, zatim potpuni naslov citiranog članka, iza toga sledi ime časopisa, godina izdavanja i početna i završna stranica (od - do). Za knjige iza naslova upisuje se ime urednika (ako ih ima), broj izdanja, prva i poslednja stranica poglavlja ili dela knjige, ime izdavača i mesto objavljivanja, ako je navedeno više gradova navodi se samo prvi po redu. Kada autor citirane podatke ne uzima iz izvornog rada, već ih je pronašao u drugom delu, uz citat se dodaje «citirano prema...».

Autori su odgovorni za izneseni sadržaj i moraju sami obezbediti eventualno potrebne saglasnosti za objavljivanje nekih podataka i priloga koji se koriste u radu.

Ukoliko rad bude prihvaćen za štampu, autori su dužni da, po uputstvu redakcije, unesu sve ispravke i dopune u tekstu i priložima.

Rukopisi i prilozi objavljenih radova se ne vraćaju. Sva eventualna objašnjenja i uputstva mogu se dobiti od Redakcionog odbora.

Radovi se mogu slati i na e-mail: [folic@uns.ac.rs](mailto:folic@uns.ac.rs) ili [miram@uns.ac.rs](mailto:miram@uns.ac.rs)

Veb sajt Društva i časopisa: [www.dimk.rs](http://www.dimk.rs)

The title should describe the content of the paper using a few words (preferably eight, and up to eleven). Abbreviations and formulas should be omitted in the title. The name and surname of the author should be provided after the title of the paper, while authors' title and position, as well as affiliation in the footnote. The author should provide his/her phone number, e-mail address and mailing address.

The abstract (summary) of about 150-250 words in Serbian and English should be followed by key words (up to seven). This is a concise presentation of the entire article and provides the readers with insight into the essential elements of the paper.

The manuscript is divided into chapters and sub-chapters, which are hierarchically numbered with Arabic numerals. The paper consists of introduction and content with results, analysis and conclusions. The paper ends with the list of references. All dimensional units must be presented in international SI measurement units. The formulas and equations should be written carefully taking into account the indexes and exponents. Symbols in formulas should be defined in the order they appear, or alternatively, symbols may be explained in a specific list in the appendix. Illustrations (tables, charts, diagrams and photos) should be in black and white, in a format that enables them to remain clear and legible when downscaled for printing: one to two columns (8 cm or 16.5 cm) in height, and maximum of 24.5 cm high, i.e. the size of the letters and numbers should be at least 1.5 mm. Original drawings should be of high quality and fully prepared for copying. They also can be high-quality, sharp and contrasting photocopies. Photos should be in black and white, on quality paper with sharp contours, which enable clear reproduction.

The list of references provided at the end of the paper should contain only papers mentioned in the text. The cited papers should be presented in alphabetical order of the authors' first name. References in the text should be numbered with Arabic numerals in square brackets, as provided in the list of references, e.g. [1]. Each citation in the text must be contained in the list of references and vice versa, each entry from the list of references must be cited in the text.

Entries in the list of references contain the author's last name and initials of his first name, followed by the full title of the cited article, the name of the journal, year of publication and the initial and final pages cited (from - to). If the doi code exists it is necessary to enter it in the references. For books, the title should be followed by the name of the editor (if any), the number of issue, the first and last pages of the book's chapter or part, the name of the publisher and the place of publication, if there are several cities, only the first in the order should be provided. When the cited information is not taken from the original work, but found in some other source, the citation should be added, "cited after ..."

Authors are responsible for the content presented and must themselves provide any necessary consent for specific information and illustrations used in the work to be published.

If the manuscript is accepted for publication, the authors shall implement all the corrections and improvements to the text and illustrations as instructed by the Editor.

Writings and illustrations contained in published papers will not be returned. All explanations and instructions can be obtained from the Board of Editors.

Contributions can be submitted to the following e-mails: [folic@uns.ac.rs](mailto:folic@uns.ac.rs) or [miram@uns.ac.rs](mailto:miram@uns.ac.rs)

Website of the Society and the journal: [www.dimk.rs](http://www.dimk.rs)

Izdavanje časopisa "Građevinski materijali i konstrukcije" finansijski su pomogli:



**INŽENJERSKA KOMORA SRBIJE**



**REPUBLIKA SRBIJA  
MINISTARSTVO PROSVETE, NAUKE I  
TEHNOLOŠKOG RAZVOJA**



**UNIVERZITET U BEOGRADU  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**



**DEPARTMAN ZA GRAĐEVINARSTVO I  
GEODEZIJU  
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA NOVI SAD**



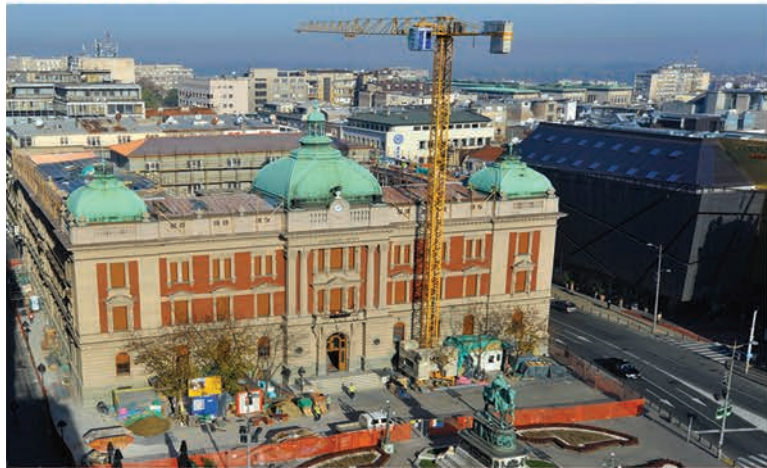
**INSTITUT IMS AD, BEOGRAD**



**UNIVERZITET CRNE GORE  
GRAĐEVINSKI FAKULTET - PODGORICA**







KOTO

**WATEST**



**25** YEARS OF **EXPERIENCE**  
IS SOMETHING THAT YOU CAN'T BUY



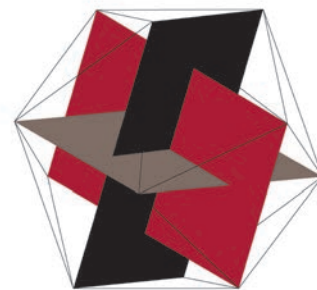
**INELAS ERECO D.O.O**

**Inelas Eresco d.o.o. se bavi prodajom i servisiranjem laboratorijske opreme u domenu ispitivanja građevinskih materijala kao što su**

- Agregati - Asfalt, bitumen i putevi - Beton - Cement i malter - Čelik - Zemljište
- Opšta laboratorijska oprema

**Inelas Eresco d.o.o. Tošin bunar 274a, Novi Beograd**  
**tel +381 11 2284 574, info@inelasereco.rs**

# Učestvuj u stvaranju arhitekture budućnosti



LafargeHolcimAwards

## 5. Međunarodna LafargeHolcim Nagrada za projekte održive gradnje

- ✓ Ukupni nagradni fond: 2.000.000 USD
- ✓ Posebna kategorija **Nova generacija** za mlade profesionalce i studente
- ✓ Prijave do 21. marta 2017.  
na [www.lafargeholcim-awards.org/enter](http://www.lafargeholcim-awards.org/enter)



Korak po korak vodič za prijavu možeš pronaći na [www.lafargeholcim-awards.org/guide](http://www.lafargeholcim-awards.org/guide)

Građevinska hemija  
za profesionalce



## TKK DODACI ZA BETONE I MALTERE I ZAŠTITNI PREMAZI

### CEMENTOL

dodaci za proizvodnju trajnog i  
kvalitetnog betona

### SILIFOB

vodootporne i druge zaštite mineralnih  
i drugih građevinskih materijala



[www.tkk.rs](http://www.tkk.rs)

TKK d.o.o., Ugrinovačka 206, 11080 Zemun

Tel: +381 11 316 91 10, M: +381 641 549 007, office@tkk.rs



# CEMENT. AGREGATI. BETON.

Kompanija CRH je vodeći diversifikovani proizvođač građevinskih materijala na svetu. CRH u Srbiji proizvodi cement, agregate i beton. CRH je posvećen unapređivanju građevinske delatnosti kroz isporuku vrhunskih materijala i proizvoda za sprovođenje i održavanje infrastrukturnih, stambenih i komercijalnih projekata. Naša kompanija za ekološka rešenja Ecorec nudi usluge odgovornog upravljanja otpadom.

[www.crhserbia.com](http://www.crhserbia.com)

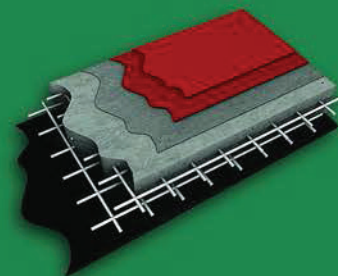
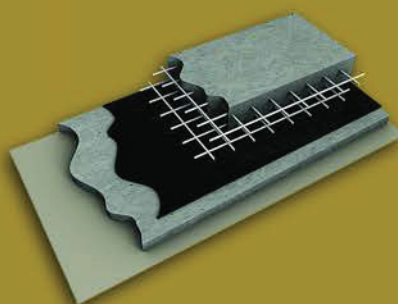
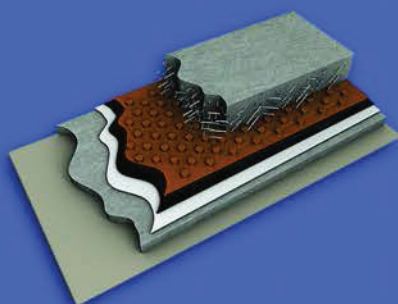


IZOMONT d.o.o. BEOGRAD Preduzeće za završne radove u građevinarstvu inženjering i konsalting

# KVALITET **POD** NOGAMA

Kompanija IZOMONT D.O.O. iz Beograda bavi se izvođenjem završnih radova u građevinarstvu. Prvenstveno smo specijalizovani za betoniranja, izradu industrijskih podova i hidroizolacija.

## HODROIZOLACIJA BETONIRANJE INDUSTRIJSKI PODOVI



**IZOMONT d.o.o.**  
Bulevar Patrijarha  
Germana 202  
11226 Beograd  
Republika Srbija

**Telefon:**  
Tel: +381 11 3907 923  
Fax: +381 11 3907 921

**Web:**  
izomont@gmail.com  
[www.izomont.co.rs](http://www.izomont.co.rs)

## NAPREDNA SIKA REŠENJA U OBLASTI STRUKTURALNIH OJAČANJA

Kompanija Sika pruža trajnu dodatnu vrednost vlasnicima građevinskih objekata, njihovim konsultantima i izvođačima, kao i tehničku podršku tokom svih faza projekta,

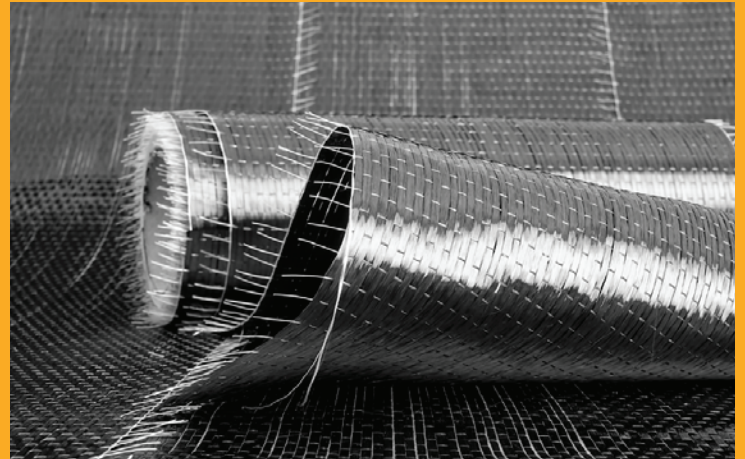
od ispitivanja uslova i razvoja inicijalnog koncepta ojačanja pa sve do uspešnog završetka i primopredaje projekta

### SIKA – VAŠ PARTNER NA GRADILIŠTU



- Globalni lider na tržištu građevine i građevinske hemije
- Najbolja tehnička ekspertiza i praksa za sanaciju betona i strukturalna ojačanja
- Odlična reputacija kod vodećih izvođača i ugovarača posla

### SIKA VREDNOSTI I INOVACIJE U GRAĐEVINI



- Integrisani proizvodi i sistemi visokih performansi koji mogu da povećaju i poboljšaju kapacitet, efikasnost, trajnost i estetiku zgrada i drugih objekata – u korist naših klijenata i boljeg održivog razvoja
- Sika mreža obučenih i iskusnih građevinskih stručnjaka

### JEDINSTVENA SIKA REŠENJA U ZAHTEVNIM USLOVIMA



- Rešenja za gotovo sve uslove apliciranja
- Kontrolisano vreme rada, vreme sazrevanja i očvršćavanja za različite vremenske uslove
- Posebna rešenja završnih ojačanja za korišćenje kod betona slabije jačine i drugih podloga

### POTVRĐENI SIKA SISTEMI I TEHNIKE APLICIRANJA



- Preko 40 godina iskustva u strukturalnim ojačanjima, sistemima i tehnikama
- Proizvodi i sistemi sa brojnim testovima i procenama kako internim tako i eksternim
- Najviši međunarodni standardi proizvodnje i kontrole kvaliteta



# Zajedno gradimo održive veze

TITAN Cementara Kosjerić deo je TITAN Grupe, multiregionalnog, vertikalno integrisanog proizvođača čementa i građevinskih materijala, sa preko 115 godina poslovnog iskustva. Grupa, čije je sedište u Grčkoj, posluje u 10 zemalja i zapošljava više od 5.500 ljudi širom sveta. Kroz svoju istoriju, TITAN je uvek kombinovao vrhunsku operativnost sa poštovanjem ljudi, društva i životne sredine.

Naš uspeh zasnovan je na korišćenju najboljih dostupnih tehnologija, sistematičnom istraživanju, stalnom unapređenju znanja i vrhunskoj stručnosti naših zaposlenih. Održivi razvoj je integralni deo našeg poslovanja, a negovanje i jačanje saradnje sa svim stejkholderima od vitalnog značaja za postavljanje čvrste osnove za održivu i bolju budućnost za sve.

Titan Cementara Kosjerić d.o.o.  
Živojina Mišića b.b.  
31260 Kosjerić, Srbija

[www.titan.rs](http://www.titan.rs)







**doka**

Oplatna tehnika.

## Merenje čvrstoće betona u realnom vremenu

Concremote® – Savremena tehnologija u službi betoniranja



### Optimizacija procesa gradnje

Smanjenje troškova radne snage i opreme skraćanjem radnih taktova na maksimum 2-3 dana.



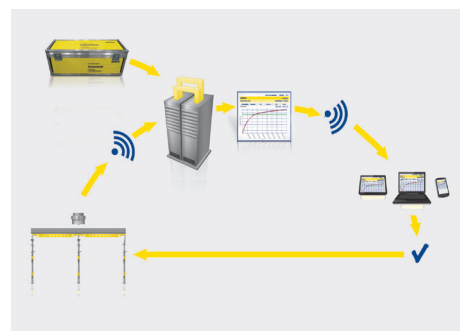
### Laka upotreba

Brza montaža mernih senzora jednostavnim postavljanjem na svež beton.



### Najsavremeniji način merenja

Concremote® se ističe svojom dokazanom pouzdanošću i lakoćom upotrebe.



Više informacija na:  
[www.doka.com/concremote](http://www.doka.com/concremote)

Gradite  
budućnost  
sa  
**pouzdanim  
partnerom.**



[www.mapei.rs](http://www.mapei.rs)  
 **MAPEI**  
GRABEVINSKI LEPKOVI • HIDROIZOLACIONI SISTEMI  
HEMIJSKI PROIZVODI ZA GRABEVINARSTVO

