

ISSN 2217-8139 (Print)  
ISSN 2334-0229 (Online)

UDK: 06.055.2:62-03+620.1+624.001.5(497.1)=861



2016.  
GODINA  
LIX



# GRAĐEVINSKI MATERIJALI I KONSTRUKCIJE

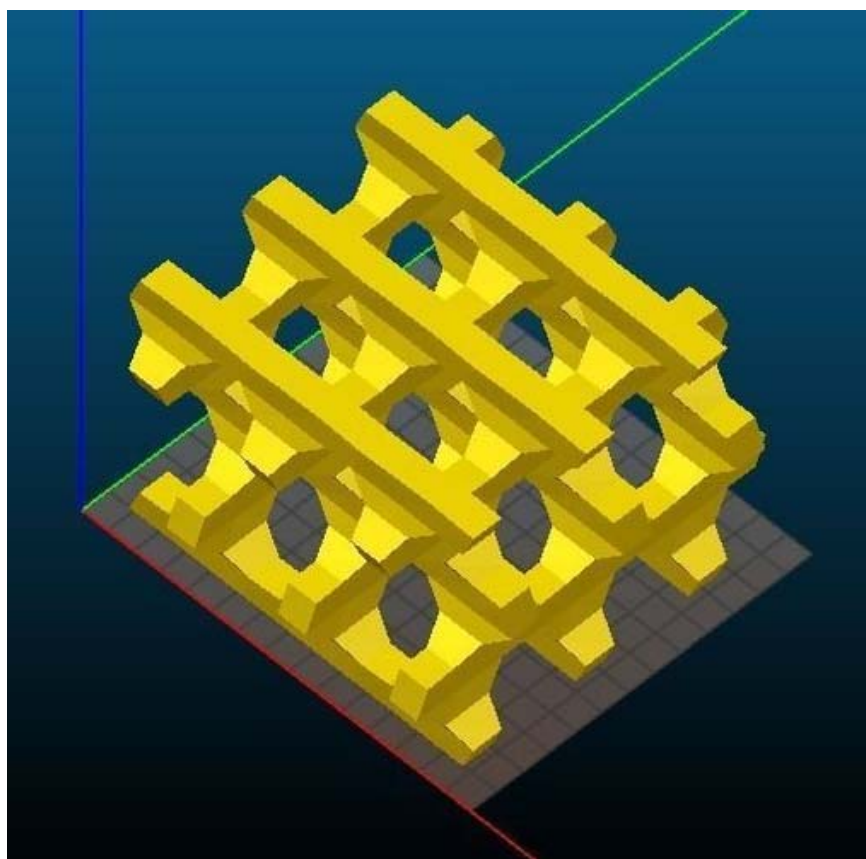
# 2

# 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

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: Veliki bea tip zeolita 3D model

COVER: Large bea type zeolite 3D model

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

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

## SADRŽAJ

<b>Svetlana KOSTIĆ</b> <b>Biljana DERETIĆ-STOJANOVIĆ</b> FORMULACIJA FIBER ELEMENTA KOD NELINEARNE ANALIZE RAMOVA <b>Pregledni rad</b> .....	3
<b>Gordana TOPLIČIĆ-ĆURČIĆ</b> <b>Dušan GRDIĆ</b> <b>Nenad RISTIĆ</b> <b>Zoran GRDIĆ</b> EKOLOŠKI ZNAČAJ, SASTAV I SVOJSTVA PROPUSNOG BETONA <b>Originalni naučni rad</b> .....	15
<b>Miroslava RADEKA</b> <b>Tiana MILOVIĆ</b> <b>Mirjana MALEŠEV</b> <b>Vlastimir RADONJANIN</b> <b>Mirjana LABAN</b> PROCES HIDRATACIJE I ČVRSTOĆA PRI PRITISKU CEMENTNIH PASTA KOJE SADRŽE PRIRODNI ZEOLIT <b>Originalni naučni rad</b> .....	29
<b>Uputstvo autorima</b> .....	46

## CONTENTS

<b>Svetlana KOSTIC</b> <b>Biljana DERETIC-STOJANOVIC</b> FIBER ELEMENT FORMULATION FOR INELASTIC FRAME ANALYSIS <b>Review paper</b> .....	3
<b>Gordana TOPLICIC-CURCIC</b> <b>Dusan GRDIC</b> <b>Nenad RISTIC</b> <b>Zoran GRDIC</b> ENVIRONMENTAL IMPORTANCE, COMPOSITION AND PROPERTIES OF PERVIOUS CONCRETE <b>Original scientific paper</b> .....	15
<b>Miroslava RADEKA</b> <b>Tiana MILOVIC</b> <b>Mirjana MALESEV</b> <b>Vlastimir RADONJANIN</b> <b>Mirjana LABAN</b> HYDRATION PROCESS AND COMPRESSIVE STRENGTH OF CEMENT PASTES CONTAINING NATURAL ZEOLITE <b>Original scientific paper</b> .....	29
<b>Preview report</b> .....	46

CIP - Каталогизacija u publikaciji  
Народна библиотека Србије, Београд

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



# FORMULACIJA FIBER ELEMENTA PRILIKOM NELINEARNE ANALIZE RAMOVA

## FIBER ELEMENT FORMULATION FOR INELASTIC FRAME ANALYSIS

Svetlana M. KOSTIĆ  
Biljana DERETIĆ-STOJANOVIĆ

PREGLEDNI RAD  
REVIEW PAPER  
UDK: 624.33.044  
doi:10.5937/grmk1602003K

### 1 UVOD

Savremeni standardi u građevinarstvu podrazumevaju primenu nelinearne analize u svakodnevnoj inženjerskoj praksi [2, 10]. Do sada su formulisani brojni konačni elementi koji uzimaju u obzir različite nelinearne uticaje. Prilikom nelinearne analize ramova, linijski gredni elementi u širokoj su upotrebi zbog svoje jednostavnosti i kompjuterske efikasnosti. Fiber elementi raspedeljene plastičnosti pokazali su se kao vrlo uspešni pri modeliranju čeličnih, betonskih i spregnutih konstrukcija [6, 12].

U ovom radu razmatraju se dve formulacije fiber konačnog elementa - prema metodi deformacija i metodi sila, kao i njihova upotreba prilikom nelinearne analize ramova. Pažnja je usmerena na tačnost određivanja lokalnog i globalnog odgovora konstrukcije, u zavisnosti od korišćene formulacije ovog konačnog elementa.

### 2 FORMULACIJA FIBER ELEMENTA RASPEDELJENE PLASTIČNOSTI PREMA METODI DEFORMACIJA

Kod elemenata raspedeljene plastičnosti, neelastične deformacije mogu se javiti u bilo kom od nekoliko posmatranih preseka duž ose elementa (slika 1a). Kod fiber grednih elemenata, izvršena je diskretizacija poprečnog preseka pomoću nekoliko tačaka integracije (vlakana, odn. fibera) i svakoj tački integracije dodeljeno je jednoosno ponašanje odgovarajućeg materijala (slika 1b).

---

Doc. dr Svetlana Kostić, dipl. inž. građ.  
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, imejl: svetlana@grf.bg.ac.rs  
V. prof. dr Biljana Deretić-Stojanović, dipl. inž. građ.  
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, imejl: biljads@eunet.rs

### 1 INTRODUCTION

According to new engineering standards, the nonlinear frame analysis has become common in professional engineering practice [2, 10]. A number of finite elements have been formulated accounting for different nonlinear effects. For inelastic frame analysis, beam/column elements are widely used because of their simplicity and computational efficiency. Distributed plasticity fiber based beam/column elements are proven to be very successful for modelling steel, concrete and composite structures [6, 12].

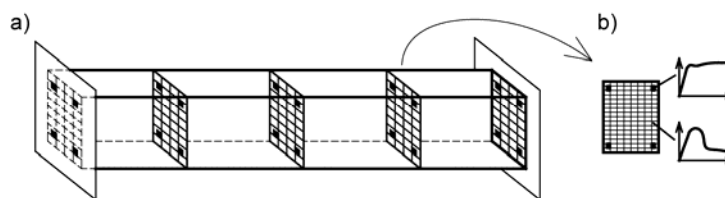
This paper discusses the use of fiber elements with displacement-based and force-based formulations in nonlinear frame analysis. The attention is focused on the accuracy of global and local response parameters depending on the element formulation.

### 2 FIBER BASED DISTRIBUTED PLASTICITY BEAM/COLUMN ELEMENT

In distributed plasticity beam/column elements, the inelastic deformations may occur in any of several monitored cross-sections along the element length (Figure 1a). In fiber based beam/column element, cross-section is discretized into a number of integration points (fibres) and an uniaxial material behaviour is assigned to each integration point (Figure 1b).

---

Doc. dr Svetlana Kostić, dipl.inž.građ.  
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, e-mail: svetlana@grf.bg.ac.rs  
V. prof. dr Biljana Deretić-Stojanović, dipl.inž.građ.  
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, e-mail: biljads@eunet.rs



Slika 1. Fiber element raspodeljene plastičnosti:  
a) posmatrani preseki duž ose elementa; b) diskretizovan poprečni presek

Figure 1. Distributed plasticity fiber based beam/column element:  
a) monitored sections along element axis; b) section discretization

Odgovor poprečnog preseka (matrica krutosti preseka  $\mathbf{k}_s$  i sile u preseku  $\mathbf{s}$ ) određuje se integracijom, odnosno, numerički sumiranjem po površini poprečnog preseka [9]:

$$\mathbf{k}_s = \sum_{i=1}^N E_{ii} \begin{bmatrix} 1 & -y_i & z_i \\ -y_i & y_i^2 & -y_i z_i \\ z_i & -y_i z_i & z_i^2 \end{bmatrix} A_i \quad (1)$$

$$\mathbf{s} = \sum_{i=1}^N \begin{bmatrix} 1 \\ -y_i \\ z_i \end{bmatrix} \sigma_i A_i \quad (2)$$

gde  $N$  predstavlja broj tačaka integracije po površini poprečnog preseka;  $E_{ii}$  – modul elastičnosti materijala dodeljenog tački integracije  $i$ ;  $A_i$ ,  $y_i$ ,  $z_i$  jesu, redom, površina, a  $y$  i  $z$  koordinate tačke integracije  $i$ .

Položaj i „numerička težina“ posmatranih poprečnih preseka mogu biti određeni na osnovu predznanja o tome gde će se najveće plastične deformacije najverovatnije javiti. Kada se posmatraju samo dva fiber preseka na krajevima linijskog elementa, dok je ostatak elementa linearno-elastičan, element pripada elementima iz grupe koncentrisane plastičnosti. S druge strane, položaj i numerička težina posmatranih preseka mogu biti određeni i izabrani pravilom integracije. Najčešće korišćena pravila jesu Gauss i Gauss-Lobatto pravila integracije zbog njihove visoke tačnosti. Prednost Gauss-Lobatto pravila jeste to što uključuje i poprečne preseke na krajevima elementa u kojima se najčešće i javljaju najveće deformacije.

Tačnost elementa, kao što je objašnjeno i kasnije u radu, dosta zavisi i od broja tačaka integracije kojim se vrši diskretizacija poprečnog preseka, kao i od broja tačaka integracije duž ose elementa, tj. od broja posmatranih poprečnih preseka.

Prilikom formulacije fiber konačnog elementa, uobičajena su dva pristupa: formulacija prema metodi deformacija i formulacija prema metodi sila [11]. U nastavku su date osnovne karakteristike obe formulacije.

## 2.1 Fiber element prema metodi deformacija

Za linijski konačni element sa slike 2, osnovne statički nepoznate u osnovnom sistemu obeležene su sa  $\mathbf{q}$ , a odgovarajuće deformacije sa  $\mathbf{v}$ . U formulaciji elementa prema metodi deformacija, pomeranje bilo koje tačke duž ose elementa  $\mathbf{u}(x)$  određuje se pomoću

The section response (the section stiffness matrix  $\mathbf{k}_s$  and the section resisting forces  $\mathbf{s}$ ) is obtained through integration, i.e. numerically, through summation over the cross-section [9]:

where  $N$  is the number of integration points over the cross-section;  $E_{ii}$  is the modulus of the uniaxial stress-strain relation assigned to the integration point  $i$ ;  $A_i$ ,  $y_i$ ,  $z_i$  are, respectively, area and  $y$  and  $z$  coordinates of the integration point  $i$ .

The position and „numerical weight“ of monitored cross-sections may be determined according to the knowledge of locations where the largest plastic deformations are most likely to appear. When only two fiber sections at the element ends are monitored, while the remaining part of the element is linear elastic, the element is fiber hinge model which belongs to the group of concentrated plasticity elements. On the other side, the chosen numerical integration rule may determine the position and numerical weight of the monitored cross-sections. The most used rules are Gauss and Gauss-Lobatto integration rules because of the high level of accuracy. The advantage of the Gauss-Lobatto rule is that it includes cross-sections at the element ends where highest deformations commonly appear.

The element accuracy, as discussed latter in the paper, largely depends on the used number of integration points for the cross-section discretization and on the number of integration points over the element length, i.e. number of monitored cross sections.

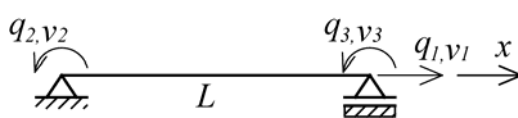
In fiber element formulation, two approaches are common: displacement based and force based formulation [11]. In the following, the main steps of the both element formulations are discussed.

## 2.1 Displacement based fiber element

For the line beam/column element in Figure 2, the basic element forces in the basic system without rigid body modes are denoted with  $\mathbf{q}$  and basic element deformations are denoted with  $\mathbf{v}$ . In the displacement

interpolacionih funkcija za pomeranja  $\mathbf{a}(x)$  (za 2D element) kao [5]:

formulation, displacements at any point along the element axis  $\mathbf{u}(x)$  may be obtained using the displacement interpolation functions  $\mathbf{a}(x)$  as [5], for 2D element:



Slika 2. Osnovni sistem 2D grednog elementa  
Figure 2. Basic forces of 2D beam/column element

$$\mathbf{u}(x) = \begin{bmatrix} u_1(x) \\ u_2(x) \end{bmatrix} = \mathbf{a}(x) \mathbf{v} = \begin{bmatrix} a_1(x) & 0 & 0 \\ 0 & a_2(x) & a_3(x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Interpolacione funkcije za pomeranja, za gredni element s dva čvora, jesu Hermite-ovi polinomi i predstavljaju rešenja diferencijalne jednačine linearno-elastičnog prizmatičnog štapa. Deformacije u bilo kojoj tački duž ose elementa  $\mathbf{e}(x)$  (tj. dilatacija  $\varepsilon(x)$ , i krivina  $\kappa(x)$ ) dobijaju se, pod pretpostavkom teorije malih deformacija, kao prvi izvod pomeranja u pravcu ose elementa (dilatacija  $\varepsilon(x)$ ) i drugi izvod pomeranja upravno na osu elementa (krivina  $\kappa(x)$ ), tj. za 2D element:

The displacement interpolation functions, for frame element with two nodes, are Hermite polynomials and represent the solution of the differential equation for a linear elastic, prismatic frame element. Deformation at any point along the element axis  $\mathbf{e}(x)$  (dilatation  $\varepsilon(x)$ , and curvature  $\kappa(x)$ ) obtains, under the assumptions of the small deformation theory, as the first derivative of the longitudinal displacement (dilatation  $\varepsilon(x)$ ) and the second derivative of the transverse displacement (curvature  $\kappa(x)$ ), i.e for 2D element:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon(x) \\ \kappa(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial^2}{\partial x^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(x) \\ u_2(x) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Stoga, za ovako usvojene interpolacione funkcije za pomeranja koje su polinomi trećeg stepena za pomeranja u pravcu upravnom na osu elementa, dobija se linearna promena krivine duž ose elementa. Ova pretpostavka prihvatljiva je u slučaju linearnog ponašanja. Međutim, kada se javljaju plastične deformacije, promena krivine duž elementa postaje izrazito nelinearna i - da bi se dobili rezultati prihvatljive tačnosti - potrebna je vrlo fina podela konačnih elemenata (tj. mreža konačnih elemenata). Ovo ograničenje metode deformacija treba imati na umu [13].

Therefore the curvature change over the element length is linear for the adopted displacement interpolation functions that are third order polynomials for transverse displacements. This assumption is acceptable for linear behaviour. However, when plastic deformations appear, the curvature distribution becomes highly nonlinear and, in order to obtain results of acceptable accuracy, the mesh refinement is necessary. This limitation of the displacement formulation should be kept in mind [13].

S druge strane, implementacija fiber elementa, formulisanog prema metodi deformacija u standardne kompjuterske programe koji su uglavnom zasnovani na metodi deformacija, jeste jednostavna budući da je određivanje stanja elementa direktno. Kada su poznata pomeranja krajeva elementa, pomoću interpolacionih funkcija, određuju se deformacije poprečnog preseka (izrazi 3 i 4); sile u preseku nalaze se direktno preko konstitutivnih relacija. Konačno, sile na krajevima elementa određuju se primenom principa virtualnih pomeranja.

On the other side, the implementation of the displacement based fiber beam/column element in standard (displacement based) computer programs is straightforward since the element state determination is direct. From known end displacements, using interpolation functions, section deformations can be obtained (Eqs. 3 and 4); section forces can be found directly from section constitutive equations. Finally, element end forces are obtained from the principle of virtual displacements.

Pored ove prednosti formulacije prema metodi deformacija, treba pomenuti i još jedno ograničenje ove formulacije: uticaj raspodeljenog opterećenja ne može se direktno uzeti u obzir, budući da se sile u preseku određuju pomoću deformacija poprečnog preseka gde ovaj efekat nije uključen [5].

Besides this advantage of displacement formulation, one more limitation should be mentioned: the effect of distributed element loading cannot be directly implemented into the formulation since section forces are derived from section deformations where this effect is not included [5].

Suprotno elementu formulisanom prema metodi sila kada je jedan element dovoljan za modeliranje stu-

Oppose to the element based on the force formulation when one element per member can be used, finer discretization per member should be used with the

ba/grede, kod fiber elemenata formuliranih prema metodi deformacija, da bi se postigao isti stepen tačnosti, potrebna je znatno finija diskretizacija. Navedeno će biti ilustrovano na narednim numeričkim primerima.

## 2.2 Fiber element prema metodi sila

Prilikom formulacije prema metodi sila, sile u bilo kom preseku duž ose elementa  $\mathbf{s}(x)$  određuju se koristeći interpolacione funkcije za sile  $\mathbf{b}(x)$  (za 2D element) kao [5]:

$$\mathbf{s}(x) = \begin{bmatrix} N(x) \\ M(x) \end{bmatrix} = \mathbf{b}(x)\mathbf{q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \left(\frac{x}{L}-1\right) & \frac{x}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

gde su  $\mathbf{q}$  osnovne statički nepoznate u osnovnom sistemu, kao što je prethodno pomenuto. Relacije između deformacija na krajevima elementa  $\mathbf{v}$  i deformacija poprečnog preseka  $\mathbf{e}(x)$  dobijaju se primenom principa virtualnih sila [5]:

$$\mathbf{v} = \int_L \mathbf{b}^T(x)\mathbf{e}(x)dx \quad (6)$$

Stoga, u ovoj formulaciji, deformacije poprečnog preseka  $\mathbf{e}(x)$  određuju se iz sila u poprečnom preseku  $\mathbf{s}(x)$ . Međutim, ove relacije nisu raspoložive, već njima inverzne [5]. Zbog toga se deformacije poprečnog preseka određuju kao rešenja nelinearnog sistema jednačina i određivanje stanja kod ovih elemenata komplikovanije je nego kod fiber elemenata zasnovanih na metodi deformacija.

S druge strane, jedna prednost elemenata zasnovanih na metodi sila treba da bude pomenuta. Uticaj raspodeljenog opterećenja duž ose elementa može se lako uključiti u formulaciju modifikovanjem relacije (5) na sledeći način [5]:

$$\mathbf{s}(x) = \mathbf{b}(x)\mathbf{q} + \mathbf{s}_p(x) \quad (7)$$

gde  $\mathbf{s}_p(x)$  predstavlja partikularno rešenje diferencijalne jednačine uslova ravnoteže za gredni element. Sve dok su poprečna pomeranja mala i uslovi ravnoteže su zadovoljeni u nedeformisanoj konfiguraciji, relacije (5), (6) i (7) jesu tačne bez obzira na prisustvo materijalnih nelinearnosti [5]. Zbog toga, samo jedan element dovoljan je za modeliranje stuba ili grede. Ovo je najvažnija prednost formulacije prema metodi sila u odnosu na formulaciju prema metodi deformacija. Međutim, kada numerički model uključuje i ploče kod kojih je neophodna finija diskretizacija konačnim elementima, grede je takođe neophodno podeliti na više elemenata u skladu s podelom ploča, a to donekle ograničava pomenutu prednost metode sila.

Tačnost lokalnog odgovora elementa zavisi od broja tačaka integracije koje su korišćene duž ose elementa, tj. od broja posmatranih poprečnih preseka. Najtačniji rezultati dobijaju se kada „numerička težina poprečnog preseka“ odgovara veličini (dužini) plastičnog zgloba. Imajući ovo u vidu, tačnost elementa neće se uvek povećati s povećanjem broja posmatranih poprečnih preseka. Tačnije, kada je u pitanju ponašanje materijala

element based on the displacement formulation in order to achieve the same level of accuracy. This would be demonstrated on the following numerical examples.

## 2.2 Force based fiber element

In force based formulation, the section forces at any point along the element axis  $\mathbf{s}(x)$  may be obtained using the force interpolation functions  $\mathbf{b}(x)$  as [5] (for 2D element):

where  $\mathbf{q}$  are basic element forces, as mentioned above. The relation between the element deformations  $\mathbf{v}$  and section deformations  $\mathbf{e}(x)$  obtains from the principle of virtual forces [5]:

Therefore, in this formulation, the section deformations  $\mathbf{e}(x)$  needs to be obtained from section forces  $\mathbf{s}(x)$ . These relations are unavailable, but inverse relations are available [5]. Therefore, the section deformations are obtained as the solution of the nonlinear system of equations and the element state determination is more complex than the element state determination for the displacement based fiber element.

On the other side the following advantage of the force based beam/column element should be mentioned. The effect of the element (distributed) load can be easily included into the formulation by modifying the relation (5) as [5]:

where  $\mathbf{s}_p(x)$  represents the particular solution of the differential equations of equilibrium for a frame element. As long as the transverse displacements are small and the equilibrium equations are satisfied in the undeformed configuration, the relations (5), (6) and (7) hold true despite of the presence of material non-linearities [5]. Therefore, only one element per beam or column member is sufficient. That is the main advantage of the force formulation over the displacement formulation. However, when numerical model includes slabs that require finer discretization, beams also need to be discretized in accordance with this finer discretization and that limits the mentioned force formulation advantages.

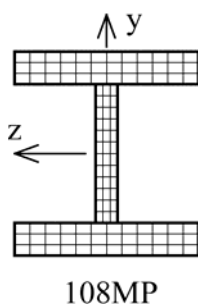
The accuracy of the local element response depends on the used number of integration points along the element axis, i.e. number of monitored cross-sections. The best quality results are obtained when the „section weight“ corresponds to the plastic length. Having this fact in mind, the element accuracy would not always increase with rapid increment of the number of the monitored sections. Actually, in the absence of



bez ojačanja, s velikim brojem poprečnih preseka odgovarajuća dužina plastičnog zgloba će biti vrlo mala i sračunata neelastična krivina nerealno velika. Stoga, za stubove je obično dovoljno uzeti tri ili četiri tačke integracije duž ose elementa. Za grede je dovoljno četiri tačke ili pet tačaka, u zavisnosti od toga da li je potrebno posmatrati presek na sredini elementa, odnosno da li je prisutno ili ne raspodeljeno opterećenje. Povećanje broja poprečnih preseka ima smisla samo u slučaju kada postoji ojačanje materijala. Tada je moguće pratiti širenje zona plastifikacije duž ose elementa.

### 3 DISKRETIZACIJA POPREČNOG PRESEKA I TAČNOST REZULTATA

Tačnost rezultata i kompjuterska efikasnost fiber elemenata raspodeljene plastičnosti umnogome zavisi od upotrebljenog broja tačaka integracije po površini poprečnog preseka. Na osnovu prikazanog [9], uočljivo je da nije potrebno koristiti nekoliko stotina tačaka integracije za poprečni presek, kao što to vrlo često istraživači rade. Rezultati prihvatljive tačnosti mogu se dobiti i sa, na primer, samo 12 tačaka integracije kod čeličnih I profila i 17 tačaka integracije kod pravougaonih betonskih preseka. U ovom radu, čelični I profil diskretizovan je 108MP diskretizacijom (slika 3) [9] kako bi se izbegle numeričke greške nastale usled diskretizacije poprečnog preseka i kako bi se analizirao uticaj formulacije elementa na njegovu tačnost.



Slika 3 108 MP šema diskretizacije  
Figure 3. 108MP discretization scheme

### 4 NUMERIČKI PRIMERI

Razlike u formulaciji fiber konačnog elementa i njihov uticaj na rezultate numeričke analize ilustrovani su u dva naredna numerička primera. Za numeričke simulacije korišćen je FEDEASLab [4], Matlab toolbox za nelinearnu statičku i dinamičku analizu.

#### 4.1 Statička pushover analiza

Prvi primer obuhvata statičku *pushover* analizu rama prikazanog na slici 4, koji je prethodno analizirao Ziemian [14]. U ovom primeru, pored rezidualnih napona, postoji i raspodeljeno opterećenje duž ose elementa. Ram poseduje svojstvo redistribucije sila s pojavom plastičnih zglobova [1].

Da bi se analizirao uticaj formulacije fiber elementa na odgovor rama, napravljena su dva modela sa

hardening, when too many sections are monitored, the corresponding plastic length is very small and the calculated inelastic curvature has become unrealistically high. Therefore, usually, for columns, 3 to 4 integration points over the element length are sufficient. For beams, 4 to 5 integration points are used depending whether the middle cross section is monitored or not, i.e. whether the distributed loading is present or not. To increase the number of monitored cross-sections has a sense only in the case when hardening is present. The spread of plastic zones over the element length can be captured in this way.

### 3 SECTION DISCRETIZATION AND ACCURACY

The accuracy and computational efficiency of the fiber based distributed plasticity beam/column element largely depends on the used number of integration points over the cross section. It was shown [9] that there is no need to use several hundred integration points for the cross section discretization as usually researchers do. The results of acceptable accuracy may be obtained using only 12 integration points for the steel WF sections and 17 integration points for the concrete rectangular section. In this study, the steel WF cross-section is discretized with 108MP discretization (Figure 3) [9] in order to avoid numerical errors due to the section discretization and to analyse the effect of different formulations on element accuracy.

### 4 NUMERICAL EXAMPLES

The discussed differences in the fiber element formulations and its effect on analysis results are illustrated on the following two numerical examples. For numerical simulations, the FEDEASLab [4], a Matlab toolbox for nonlinear static and dynamic analysis is used.

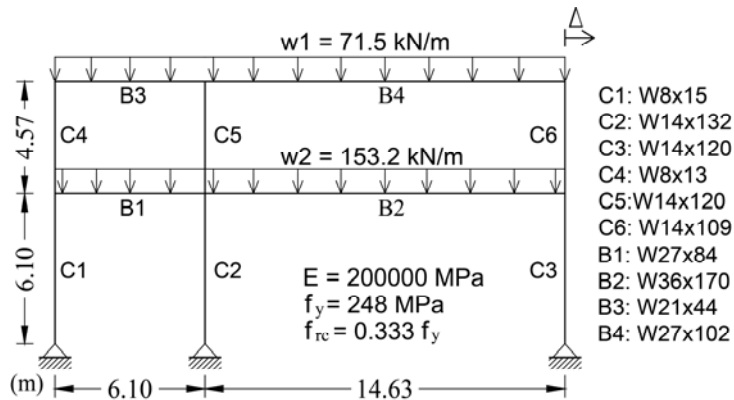
#### 4.1 Static pushover analysis

The first example involves the static pushover analysis of the low-rise frame in Figure 4, previously studied by Ziemian [14]. In this example, besides residual stresses, the distributed element loading is present. The frame shows the effect of force redistribution upon plastic hinge formation [1].

To investigate the effect of the fiber element formulation on the frame response, two models with elements

elementima formulisanim prema obe metode. Oba modela analizirana su s nekoliko diskretizacija. Podaci o ovim diskretizacijama dati su u Tabeli 1, gde  $n_e$  označava broj konačnih elemenata po stubu/gredi, a  $n_{ip}$  označava broj tačaka integracije duž ose elementa.

based on both formulations are created. Both models are used with several discretizations. Details about these discretizations are given in Table 1, where  $n_e$  denotes the number of elements per member and  $n_{ip}$  denotes the number of integration points over the element length.



Slika 4. Ziemian ram  
Figure 4. Ziemian low-rise frame

Kada su u pitanju oba modela, pretpostavljena je raspodela rezidualnih napona prilikom koje se naponi menjaju linearno u flanšama i imaju najveću vrednost pritiska od  $0.333\sigma_y$ , dok je raspodela rezidualnih napona u rebru konstantna [7]. Kod fiber grednog konačnog elementa, rezidualni naponi zadaju se kao inicijalni naponi svakom vlaknu poprečnog preseka na početku analize. Zbog 2D varijacije rezidualnih napona po površini poprečnog preseka, potrebna je diskretizacija preseka u pravcu ose  $y$ - i u pravcu ose  $z$ - poprečnog preseka i u slučaju 2D analize rama.

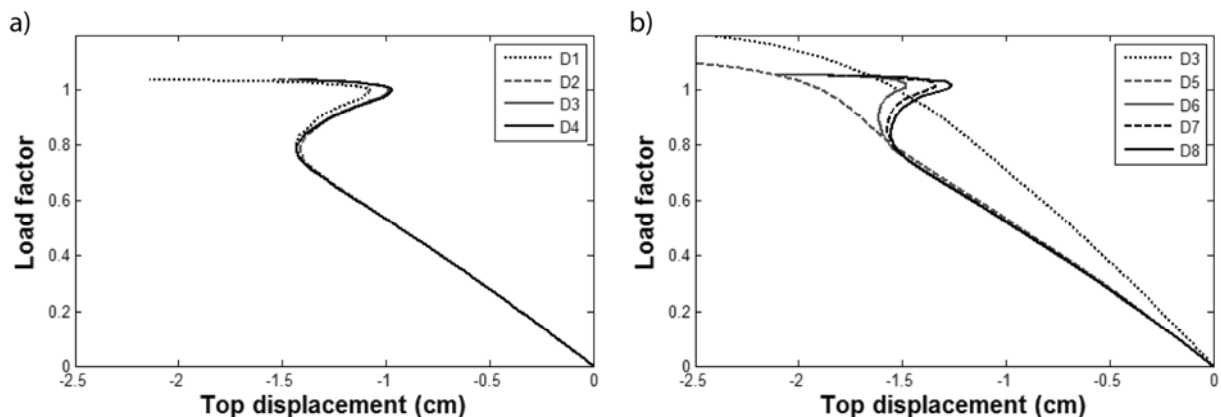
In both models, the residual stress pattern is assumed to vary linearly in the flange with peak stress in compression of  $0.333\sigma_y$  and constant tensile stress in the web [7]. The fiber beam-column element accounts for the residual stress pattern with the assignment of an initial stress to each fiber at the start of the analysis. Because of the 2D variation of residual stresses over the cross section, a fiber discretization in the  $y$ - and  $z$ -axis of the cross section is required, even for a 2D frame analysis.

Tabela 1. Podaci o diskretizacijama rama  
Table 1. Details about used frame discretizations

Discretization Diskretizacija	Column C1-C6 Stub C1-C6		Beam B1, B3 Greda B1, B3		Beam B2, B4 Greda B2, B4		Total number of elements Ukupan broj elemenata
	$n_e$	$n_{ip}$	$n_e$	$n_{ip}$	$n_e$	$n_{ip}$	
D1	1	4	1	5	1	5	10
D2	1	4	1	5	1	7	10
D3	1	4	2	5	4	5	18
D4	1	4	2	5	4	7	18
D5	2	3	8	5	16	5	60
D6	4	3	16	5	32	5	120
D7	4	3	32	5	64	5	216
D8	4	3	64	5	128	5	408

Materijal je elastično-idealno plastičan. Geometrijske nelinearnosti uzete su u obzir primenom korotacione formulacije [3].

The material model is assumed elastic-perfectly plastic. The nonlinear geometry under large displacements is accounted for with the corotational formulation [3].



Slika 5. Pomeranje vrha rama-faktor opterećenja za  
a) fiber element prema metodi sila; b) fiber element prema metodi deformacija

Figure 5. Top displacement-load factor relation for  
a) force based fiber element; b) displacement based fiber element

Slika 5 prikazuje rezultate za zavisnost vrha pomeranja rama  $\Delta$  od faktora opterećenja za dva modela i različitim diskretizacijama rama. Rezultati se slažu s rezultatima drugih autora [1]. Prednosti formulacije prema metodi sila nad formulacijom prema metodi deformacija evidentne su u ovom primeru, naročito zbog mogućnosti metode sila da direktno uzme u obzir uticaj raspodeljenog opterećenja duž ose elementa modifikovanjem interpolacionih funkcija za sile. Kao posledica, u formulaciji prema metodi sila diskretizacija rama sa samo jednim elementom po stubu/gredi daje rezultate prihvatljive tačnosti. Nasuprot tome, kod modela s fiber elementom prema metodi deformacija potrebna je mnogo finija diskretizacija da bi se postigao isti nivo tačnosti.

Figure 5 shows the results for the top displacement  $\Delta$  - load factor relation of the two models with different discretization schemes. These results agree well with the results obtained by the other authors [1]. The advantages of the force-based element over the displacement-based element are evident in this example with the capability of the former to account directly for the presence of distributed element loading by modification of the force interpolation functions. As a consequence, the discretization with only one force-based fibre beam-column element per member provides the results of acceptable accuracy. On the contrary, for the model with displacement-based fiber beam-column element, for the same level of accuracy, much finer discretization needs to be used.

#### 4.2 Nelinearna dinamička analiza

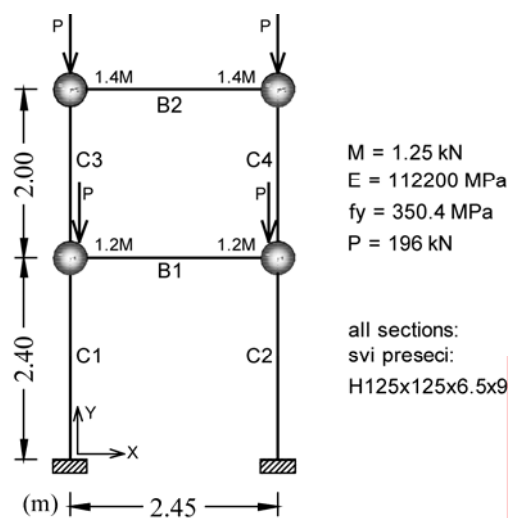
Drugi primer prikazuje nelinearnu dinamičku analizu dvospratnog rama, prikazanog na slici 6. Prostornu 3D verziju ovog rama analizirali su Kim i drugi [8]. Karakteristike materijala prikazane su na slici 6. Model je usvojen kao elastičan-idealno plastičan.

Ram je prvo opterećen konstantnim gravitacionim opterećenjem, a zatim zemljotresnim opterećenjem 1940 El Centro zapisa skaliranog tako da je maksimalno ubrzanje tla (PGA) 1.2753g, u X pravcu. Mase su koncentrisane u čvorovima s vrednostima prikazanim na slici 6. Pretpostavljeno je viskozno prigušenje u iznosu od 4% za prva dva svojstvena tona oscilovanja elastične konstrukcije. Slično kao u prethodnom primeru, diskretizacije rama koje su korišćene prikazane su u Tabeli 2.

#### 4.2 Nonlinear time history analysis

The second example refers to the nonlinear time history analysis of a small two-story frame from Figure 6. 3D version of this frame was studied by Kim et al. [8]. Data about the frame geometry and material properties are given in Figure 6. The material model is assumed to be elastic-perfectly plastic.

The frame is first subjected to the constant gravity loading and, then, to a ground excitation in X direction with the 1940 El Centro record scaled to a peak ground acceleration (PGA) of 1.2753g. The mass is lumped at each node with a value given in Figure 6. Rayleigh damping was assumed in the analysis with 4% viscous damping ratio for the first two vibration modes of the elastic structure. Similarly to the previous example, the used discretizations are explained in Table 2.



Slika 6. Dvospratni ram  
Figure 6. Two-story frame

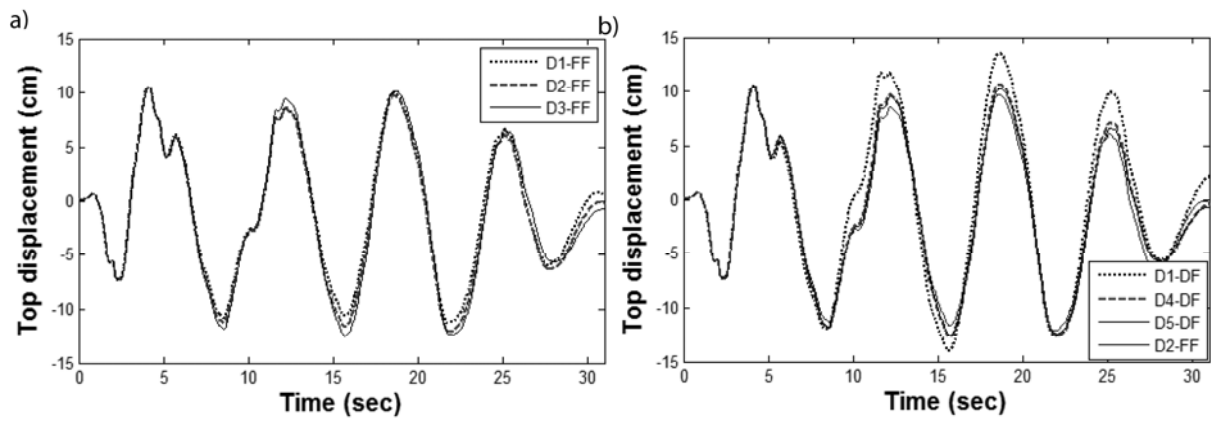
Tabela 2: Podaci o diskretizacijama dvospratnog rama  
Table 2: Details about used two-story frame discretizations

Discretization Diskretizacija	Columns		Beams		Total number of elements: Ukupan broj elemenata:
	$n_e$	$n_{ip}$	$n_e$	$n_{ip}$	
D1	1	4	1	5	6
D2	2	4	2	4	12
D3	4	4	4	4	24
D4	8	4	8	4	48
D5	16	4	16	4	96
D6	24	4	24	4	144

Slika 7 prikazuje istoriju pomeranja vrha rama, a slike 8 i 9 prikazuju promenu momenta savijanja i aksijalne sile za presek u uklještenju stuba C1.

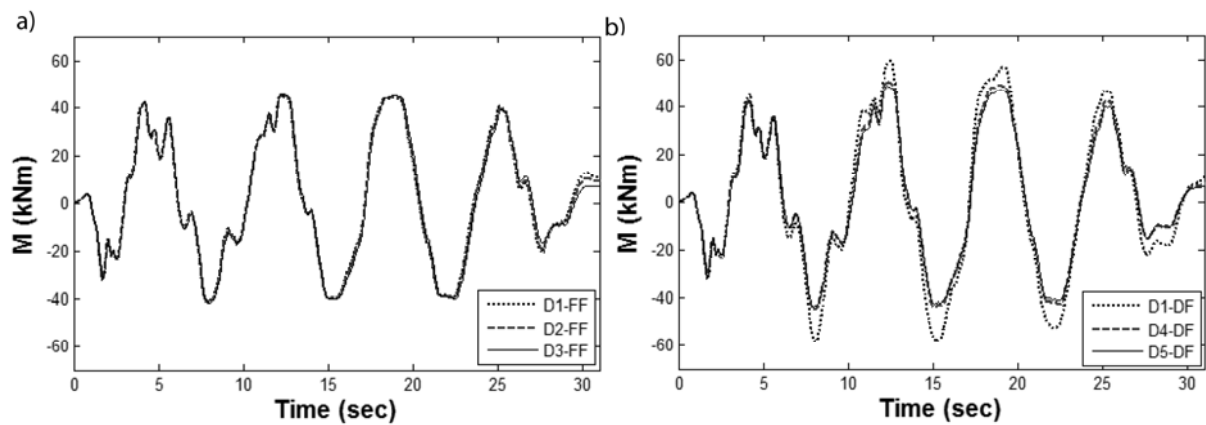
Kao što se može videti, kod modela s fiber elementom prema metodi sila, čak i diskretizacija sa samo jednim elementom po stubu/gredi daje rezultate vrlo visoke tačnosti kako za pomeranje vrha, tako i za sile u preseku. Da bi se postigao isti nivo tačnosti pomoću modela s fiber elementom prema metodi deformacija, ponovo je neophodna mnogo finija diskretizacija.

Figure 7 shows the top story displacement history, and Figures 8 and 9 show bending moment history and axial force history for column C1, section at fixed end. It can be seen that even the model with the coarsest discretization with the fibre element with force formulation that has only one element per member gives results of great accuracy for both, top displacement and section forces. To achieve the same level of accuracy with the fiber element with displacement formulation, much finer discretization is required.



Slika 7. Pomeranje vrha rama za  
 a) fiber element prema metodi sili; b) fiber element prema metodi deformacija

Figure 7. Top displacement history for  
 a) force based fiber element; b) displacement based fiber element



Slika 8. Moment savijanja u stubu C1, presek kod uklještenja za  
 a) fiber element prema metodi sili; b) fiber element prema metodi deformacija

Figure 8. Bending moment history for column C1, section at fixed end for  
 a) force based fiber element; b) displacement based fiber element

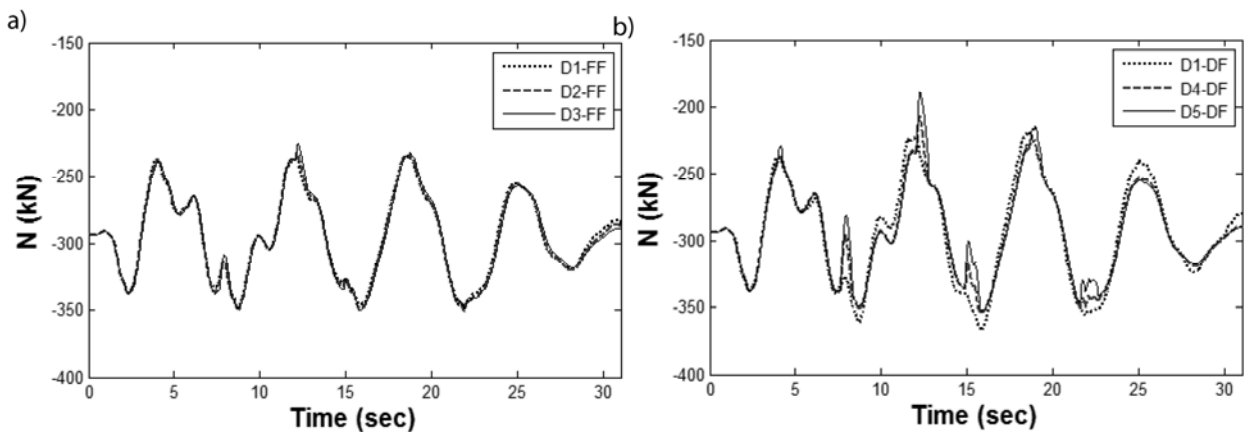


Figure 9: Aksijalna sila u stubu C1, presek kod uklještenja za  
 a) fiber element prema metodi sili; b) fiber element prema metodi deformacija

Figure 9. Axial force history for column C1, section at fixed end for  
 a) force based fiber element; b) displacement based fiber element

## 5 ZAKLJUČAK

Fiber element raspodeljene plastičnosti pokazao se kao vrlo uspešan u nelinearnoj analizi ramova. Prilikom formulacije elementa, uobičajena su dva pristupa: prema metodi sila i prema metodi deformacija. Osnovna prednost formulacije prema metodi sila jeste to što je jedan element po stubu s tri ili četiri tačke integracije duž ose, odnosno, jedan element po gredi s četiri tačke ili pet tačaka integracije duž ose elementa dovoljan i što se uticaj raspodeljenog opterećenja lako može uzeti u obzir direktno formulacijom. S druge strane, osnovna prednost fiber elementa prema metodi deformacija jeste njegova jednostavnost.

Pomoću dva numerička primera, pokazano je da se za postizanje istog nivoa tačnosti globalnog odgovora, mora koristiti mnogo finija konačnih elemenata kod modela s fiber elementom prema metodi deformacija. U slučaju lokalnih parametara odgovora, neophodno je čak dalje progušćenje mreže konačnih elemenata kod modela prema metodi deformacija. Stoga, treba imati na umu da dve formulacije fiber elementa nisu ekvivalentne i da se ovi elementi ne mogu koristiti na isti način.

## Zahvalnost

Prvi autor zahvaljuje Ministarstvu nauke Republike Srbije za finansijsku podršku u okviru projekta TR 36046.

## 6 LITERATURA REFERENCES

- [1] Attalla, M.R., G.G. Deierlein, and W. McGuire, Spread of plasticity: quasi-plastic-hinge approach. *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 1994. **120**: p. 2451-2473.
- [2] Cosic, M. and S. Brcic, Typology of NSPA pushover curves and surfaces for 3D performance-based seismic response of structures. *Building materials and structures*, 2013. **56**(4): p. 19-38.
- [3] Crisfield, M.A., *Non-linear finite element analysis of solids and structures*. 1991, West Sussex: John Wiley & Sons.
- [4] Filippou, F.C. and M. Constantinides, *FEDEASLab Getting Started Guide and Simulation Examples*. 2004, University of California, Berkeley.
- [5] Filippou, F.C. and G.L. Fenves, *Methods of Analysis for Earthquake-Resistant Structures*, in *Earthquake Engineering: From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering*, Y. Bozorgnia and V.V. Bertero, Editors. 2004, CRC Press.
- [6] Hajjar, J.F., A. Molodan, and P.H. Schiller, A distributed plasticity model for cyclic analysis of concrete-filled steel tube beam-columns and composite frames. *Engineering Structures*, 1998. **20**(4-6): p. 398-412.
- [7] Ketter, R.L., E.L. Kaminsky, and L.S. Beedle, Plastic deformation of wide-flange beam columns. *Transactions ASCE*, 1955. **120**: p. 1028-1069.

## 5 CONCLUSION

Fiber based distributed plasticity beam/column element has proven to be very efficient for nonlinear frame analysis. Usually two element formulations are used: force based and displacement based. The main advantage of the force formulation is that one element with 3 to 4 integration points per column and 4 to 5 integration points per beam are sufficient and that effect of distributed element loading can easily be included into the formulation. On the contrary, the main advantage of the displacement formulation is its simplicity.

On the two numerical examples it is shown that for the same level of global response, much finer element discretization needs to be used when displacement based fiber beam/column element is used. For the local element response measures, even further discretization refinement is necessary. In conclusion, the two formulations are not equivalent and the two elements cannot be used in the same way.

## Acknowledgement

The first author thanks the Ministry of Science of the Republic of Serbia for financial support under project number TR 36046.

## SUMMARY

### FORMULACIJA FIBER ELEMENTA KOD NELINEARNE ANALIZE RAMOVA

Svetlana KOSTIĆ  
Biljana DERETIĆ-STOJANOVIĆ

U radu su prikazane dve formulacije fiber konačnog elementa raspodeljene plastičnosti. Za metodu sila i metodu deformacija, ukazano je na osnovne razlike dve metode. Razlike u rezultatima analize koje se dobijaju primenom fiber elementa prema ove dve formulacije prikazane su putem dva numerička primera. Prvi primer obuhvata statičku *pushover* analizu rama s raspodeljenim opterećenjem duž greda. Drugi primer je nelinearna dinamička analiza dvospratnog rama izloženog zemljotresnom opterećenju. Prikazane su razlike kod dobijenog globalnog i lokalnog odgovora u zavisnosti od formulacije i diskretizacije rama. U zaključku, rezimirane su primene dve formulacije fiber elementa i date napomene u vezi s njihovim korišćenjem.

**Key words:** fiber konačni element, raspodeljena plastičnost, metoda sila, metoda deformacija

## REZIME

### FIBER ELEMENT FORMULATION FOR INELASTIC FRAME ANALYSIS

Svetlana KOSTIĆ  
Biljana DERETIĆ-STOJANOVIĆ

The paper discusses two formulations for the fiber based distributed plasticity beam/column element. For force based and displacement based formulations, basic details and main differences are emphasized. The differences in results of analysis when elements with these two formulations are used are demonstrated on two numerical examples. The first example involves the nonlinear static pushover analysis of low-rise frame with distributed element loading. The second example is nonlinear time history analysis of two-story frame subjected to earthquake loading. The differences in global and local response depending on the used finite element discretization are shown. In conclusion, the advantages of force based formulation and directions for the use of the two elements are summarized..

**Ključne reči:** fiber based beam/column element, distributed plasticity, force formulation, displacement formulation





# EKOLOŠKI ZNAČAJ, SASTAV I SVOJSTVA PROPUSNOG BETONA

## ENVIRONMENTAL IMPORTANCE, COMPOSITION AND PROPERTIES OF PERVIOUS CONCRETE

Gordana TOPLIČIĆ-ĆURČIĆ  
Dušan GRDIĆ  
Nenad RISTIĆ  
Zoran GRDIĆ

ORIGINALNI NAUČNI RAD  
ORIGINAL SCIENTIFIC PAPER  
UDK: 666.974  
doi:10.5937/grmk1602015T

### 1 UVOD

Prirodni resursi se danas povećano troše usled brze urbanizacije i građevinskih aktivnosti. Inženjeri istražuju mogućnost primene različitih strategija s ciljem zaštite i obnove prirodnih ekosistema [1].

Jedan od elemenata održivog graditeljstva tj. ekomaterijala jeste i propusni ili porozni beton. Propusni beton, slika 1, može se definisati kao krupnozrni beton koji dozvoljava atmosferskoj vodi, tj. kišnici da se procepi kroz njega u posteljicu (ACI Committee 522 - 2006). Može se koristiti kao zastor za: pešačke staze, trotoare, kolske prilaze, parkinge i kolovoze - za saobraćaj niskog intenziteta. Ova vrsta betona je svetlih boja, hladniji je od konvencionalnog betona i pomaže da se umanje temperature u gradovima, kao i da se poboljša kvalitet vazduha. Za razliku od glatke površine konvencionalnog betona, površinska tekstura propusnih betona nešto je hrapavija [2,3].

Osnovna primena propusnog betona je upravljanje otcicanjem atmosferske vode, tj. kišnice (*engl.: stormwater runoff management – SWM*) [4].

### 1 INTRODUCTION

Presently natural resources are increasingly consumed due to rapid urbanization and thereafter human construction activities. Various strategies are being investigated by engineers to protect and restore natural ecosystems in the world [1].

One of the elements of sustainable construction engineering is using ecomaterials i.e. pervious or porous concrete. Pervious concrete, figure 1, can be defined as an open graded concrete that allows rain water to percolate through to the underlying sub-base (ACI Committee 522 - 2006). Pervious concrete has performed successfully as pavement in pedestrian walkways, sidewalks, driveways, parking lots, and low-volume roadways. This kind of concrete has the light colour which is cooler than conventional asphalt and helps to reduce urban temperatures and improve air quality. Unlike the smoothed surface of conventional concrete, the surface texture of pervious concrete is slightly rougher [2,3].

The primary application of pervious concrete is stormwater, i.e. rainwater runoff management (*stormwater runoff management – SWM*) [4].

---

Gordana Topličić-Ćurčić, vanredni profesor  
Univerzitet u Nišu, Građevinsko-arhitektonski fakultet,  
18000 Niš, R. Srbija, gordana.toplicic.curcic@gaf.ni.ac.rs  
Dušan Grdić, MSc, asistent  
Univerzitet u Nišu, Građevinsko-arhitektonski fakultet,  
18000 Niš, R. Srbija, dusan.grdic@gaf.ni.ac.rs  
Nenad Ristić, docent  
Univerzitet u Nišu, Građevinsko-arhitektonski fakultet,  
18000 Niš, R. Srbija, nenad.ristic@gaf.ni.ac.rs  
Zoran Grdić, redovni profesor  
Univerzitet u Nišu, Građevinsko-arhitektonski fakultet,  
18000 Niš, R. Srbija, zoran.grdic@gaf.ni.ac.rs

---

Gordana Toplicic-Curcic, Associate professor, University of Nis, The Faculty of Civil Engineering and Architecture, 18000 Nis, R. Serbia, gordana.toplicic.curcic@gaf.ni.ac.rs  
Dusan Grdic, MSc, asistent, University of Nis, The Faculty of Civil Engineering and Architecture, 18000 Nis, R. Serbia, dusan.grdic@gaf.ni.ac.rs  
Nenad Ristic, Assistant professor, University of Nis, The Faculty of Civil Engineering and Architecture, 18000 Nis, R. Serbia, nenad.ristic@gaf.ni.ac.rs  
Zoran Grdic, Full professor, University of Nis, The Faculty of Civil Engineering and Architecture, 18000 Nis, R. Serbia, zoran.grdic@gaf.ni.ac.rs

Kišnica prolazi kroz zastor od propusnog betona i proceđuje se kroz posteljicu u zemljanu podlogu. Projektovanje propusnog betonskog sistema prevashodno je ograničeno karakterističnim infiltracionim svojstvima podloge [5].

Dotok vode koji prevazilazi infiltracioni kapacitet podloge, privremeno se skladišti u šupljinama posteljice pre oticanja u podlogu (što se naziva eksfiltracija) ili pre otpuštanja natrag u površinski oticaj putem sistema odvodnjavanja u posteljici.



Slika 1. Propusni beton [6,7,8]  
Figure 1. Pervious concrete [6,7,8]

Ako sistem nema dovoljan kapacitet za zadržavanje vode, on se može povećati na više načina: povećanjem debljine propusnog sloja posteljice, povećanjem veličine odvoda ili veličine sistema. Debljinu samog propusnog betona ne treba menjati [9].

## 2 EKOLOŠKE PREDNOSTI PROPUSNOG BETONA

Nacionalni istraživački savet komiteta o upravljanju urbanim atmosferskim vodama u SAD (engl.: *The National Research Council (NRC) Committee on Urban Stormwater Management in the United States*) [10], opisuje kontaminante u oticaju kišnice kao osnovni faktor ugrožavanja kvaliteta voda i kao jedan od najvećih izazova u kontroli (sprečavanju) zagađenja voda.

Kontaminanti u većem delu ostaju u površinskom i posteljičnom sloju propusnog betonskog sistema. Povišene koncentracije kontaminanata ima u tlu ispod sistema poroznog betona, što ukazuje na potencijal za apsorpciju i retenciju (zadržavanje) vodene faze kontaminanata. Mogućnost „zarobljavanja“ CO<sub>2</sub> u zastorima od propusnog betona jeste područje aktuelnih istraživanja u oblasti održivog graditeljstva [9].

Propusni beton priznat je od strane Američkog saveta za zelenu gradnju (engl.: *United States Green Building Council (USGBC)*), koji uspostavlja sistem za rangiranje zelene gradnje, poznatiji kao program pod nazivom „Vođstvo u energetskom i ekološkom projektovanju“ (engl.: *The Leadership in Energy and Environmental Design (LEED)*) [11]. Ovaj program je u Americi prihvaćen kao referenca za projektovanje, građenje i funkcionisanje zelenih zgrada visokih performansi. On navodi sledeće prednosti korišćenja propusnog betona:

- Korišćenje propusnog betona može značajno

Stormwater infiltrates through the pervious concrete pavement and percolates through the subbase to the underlying subgrade soils. The design of a pervious concrete system is primarily constrained by site-specific infiltration properties of subgrade soils [5].

Inflow in excess of the underlying soil infiltration rate is temporarily stored in the subbase voids before draining to the subgrade soils (referred to as exfiltration) or discharging back to surface runoff through subbase drains.

If the system has insufficient water retention capacity, the capacity may be increased by increasing the thickness of the permeable subgrade or increasing drain sizes or numbers. The thickness of the pervious concrete should be unchanged [9].

## 2 ENVIRONMENTAL BENEFITS OF PERVIOUS CONCRETE

The National Research Council (NRC) Committee on Urban Stormwater Management in the United States [10], described contaminants in stormwater runoff as a principal contribution to water quality impairment of the waters, and one of the greatest challenges in water pollution control.

Contaminants are largely retained in the surface and subbase of pervious concrete systems. Elevated concentrations of urban contaminants have been observed in the subgrade soils underlying pervious concrete systems, indicating the potential for absorption and retention of aqueous phase contaminants. The potential for CO<sub>2</sub> sequestration in the pervious concrete pavement system is an area of active sustainability research [9].

Pervious concrete is recognized by United States Green Building Council (USGBC), which sets the green building rating system known as the LEED program (The Leadership in Energy and Environmental Design [11]. The LEED program is the nationally accepted benchmark for the design, construction, and operation of high performance “green” buildings. It stipulates the following advantages of using the pervious concrete:

- Using pervious concrete can contribute immensely to managing stormwater runoff as well as providing on-site infiltration and reducing contaminant loading before

doprinjeti upravljanju oticanjem atmosferskih voda, obezbediti njihovu infiltraciju i smanjiti količinu kontaminanata pre nego što oteknu u podzemne vode.

- Svetlije boje nego zastorski asfalt, propusni beton ima sposobnost da reflektuje sunčevo zračenje. Relativno otvorena struktura pora akumulira manje toplote nego asfaltni zastor [12,13].

- Drveće i drugo parterno uređenje teško uspeva u zatvorenim područjima zbog teško dostupne vode i vazduha koji ne prolaze kroz nepropusne zastore. Korišćenje propusnih betona smanjuje potrebu za korišćenjem pijaće vode za navodnjavanje.

- Agregat u mešavinama propusnih betona može sadržati određen procenat recikliranih agregata, a da ne ugrozi integritet konstruktivnih performansi ili trajnost propusnog betona [14].

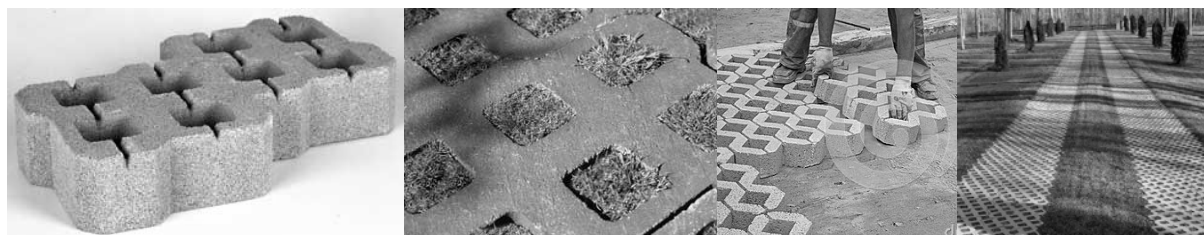
- Slično konvencionalnom betonu, za propusni beton može da se koristi prirodni kamen i drugi agregati koji su lokalno dostupni. Na taj način se smanjuje zagađenje nastalo transportom materijala [12,13].

### 3 VRSTE PROPUSNOG BETONA

Postoji nekoliko vrsta propusnih zastora koji se koriste u praksi, a to su: propusni beton, slika 1, propusni beton od elemenata sa žljebovima za spajanje, slika 2, i propusni beton od „mrežastih“ elemenata, slika 3 [15].



Slika 2. Propusni beton od elemenata sa žljebovima za spajanje [16,17,18,19]  
Figure 2. Permeable interlocking concrete pavements [16,17,18,19]



Slika 3. Propusni beton od „mrežastih“ elemenata [20, 21, 22, 23]  
Figure 3. Pervious paving made of concrete grid pavers [20, 21, 22, 23]

**Propusni beton od elemenata sa žljebovima za spajanje** (engl.: *Permeable Interlocking Concrete Pavements (PICP)*) ima spojeve ili otvore koji su napunjeni propusnim materijalom koji omogućava vodi da se infiltrira kroz propusnu površinu (slika 2). Spojevi i/ili otvori zahvataju oko 5% do 15% ukupne površine zastora. Tipičan poprečni presek ovog sistema propusnog betona prikazan je na slici 4 [24].

entering the groundwater.

- With lighter colour than paved asphalt, pervious concrete has the ability to reflect solar radiation. The relatively open pore structure also stores less heat than paved asphalt [12,13].

- Trees and other landscaping have a hard time growing and thriving in covered areas due to the difficulty of getting water and air through the impervious pavements. Using pervious concrete reduces the need for potable water for irrigation.

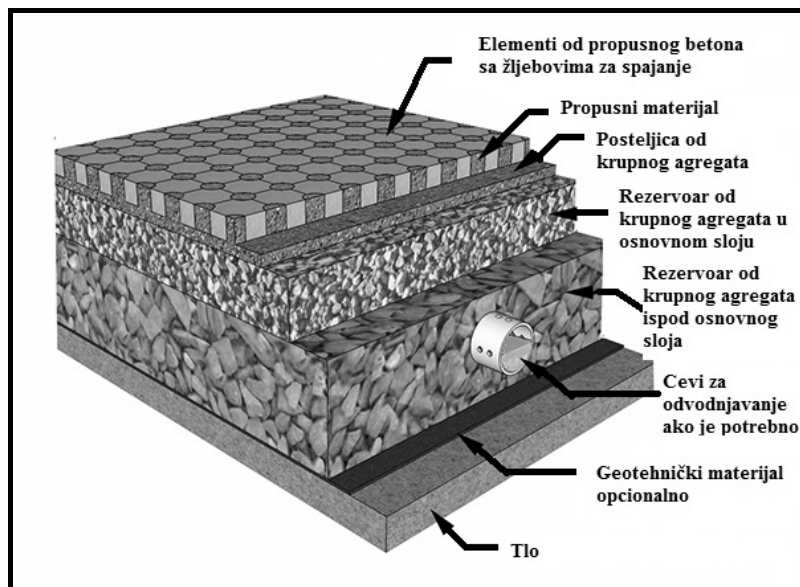
- The aggregate used in the pervious concrete mix can contain a percentage of recycled aggregate without compromising the integrity of the structural performance or durability of pervious concrete [14].

- Similar to conventional concrete, pervious concrete can utilize much of the natural stone and other such aggregates that are local to the building site; thereby reducing the pollution needed to transport materials [12,13].

### 3 TYPES OF PERVIOUS CONCRETE

There are several types of pervious pavements used in practice, such as: pervious concrete, figure 1, permeable interlocking concrete pavements, figure 2, and concrete grid pavers, figure 3 [15].

**Permeable Interlocking Concrete Pavements (PICP)** has joints or openings which are filled with a pervious material which allows water to infiltrate through the pervious surface (figure 2). Joints and/or openings occupy around 5% to 15% of the total pavement surface area. Typical cross section of Permeable Interlocking Concrete Pavement (PICP) system is presented in figure 4 [24].



Slika 4. Tipičan poprečni presek sistema propusnog betona od elemenata sa žljebovima za spajanje [25]  
Figure 4. Typical cross-section of permeable interlocking concrete pavement [25]

Slojevi sistema tipičnog poprečnog preseka propusnog betona sa žljebovima za spajanje na slici 4, odozgo na dole su: elementi od propusnog betona sa žljebovima za spajanje, propusni materijal između napred navedenih elemenata, posteljica od krupnog agregata, rezervoar od krupnog agregata u osnovnom sloju, rezervoar od krupnog agregata u sloju ispod osnovnog (sa cevi za odvodnjavanje, ako je potrebno), geotehnički materijal (opcionalno) i tlo.

Posteljica od krupnog agregata obično je debljine oko 5 cm. Ona omogućava infiltraciju i obezbeđuje ravnu podlogu za zastor.

Rezervoar od krupnog agregata u osnovnom sloju takođe je propustljiv, obično je 10 cm debljine i sastoji se od lomljenog kamena veličine od 1.2 do 2.5 cm.

Rezervoar od krupnog agregata u sloju ispod osnovnog sloja ima zrna veličine od 5 do 8 cm. Debljina ovog sloja zavisi od potreba za skladištenjem vode i saobraćajnog opterećenja.

Ako prirodno zemljište koje se nalazi ispod sistema propusnog betona od elemenata sa žljebovima za spajanje ne obezbeđuje adekvatnu infiltraciju, u rezervoar od krupnog agregata u sloju ispod osnovnog, može se ugraditi perforirana cev za odvodnjavanje (kao što je prikazano na slici 4) koja će vodu sprovesti van sistema.

Između sloja od krupnog agregata ispod osnovnog sloja i nezbijene podloge prirodnog tla može se staviti membrana od geotekstila. Namena sloja od geotekstila jeste da odvoji rezervoar ispod osnovnog sloja od prirodnog tla. Na taj način se sprečava da sitne čestice iz tla pređu u gornje slojeve [22].

Na slici 5 prikazana su tri tipa sistema propusnog betona „Lafarge Tarmac's Topmix” koji su dostupni i na našem tržištu [26].

The layers of the permeable interlocking concrete pavement system in figure 6, top to bottom are: concrete pavers, open-graded bedding course, open-graded base reservoir (with underdrain, as required), open-graded subbase reservoir, geotextile (optional) and subgrade soil.

The open-graded bedding course is usually around 5 cm thick. It allows infiltration and provides level bed for the pavement.

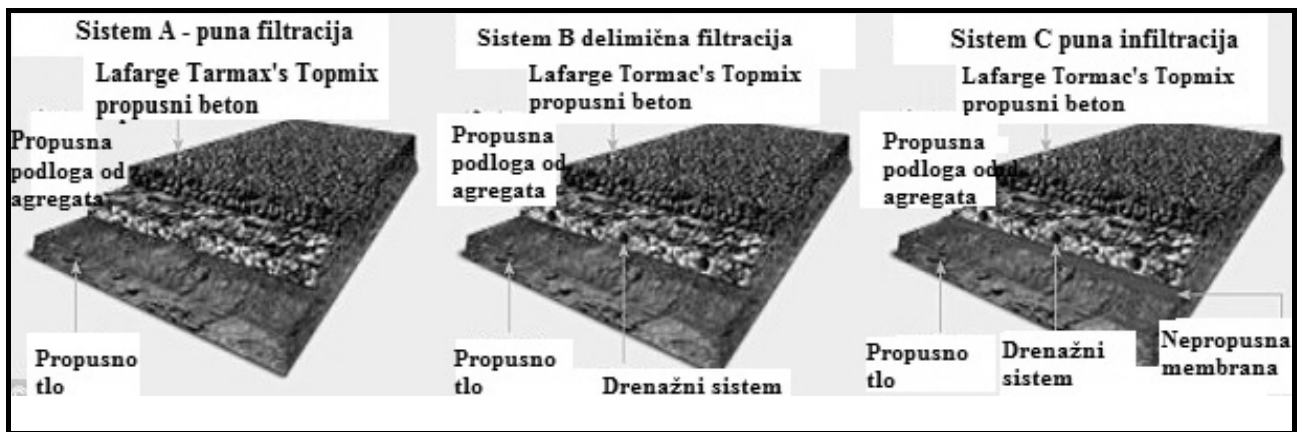
The open-graded base reservoir is also permeable, usually around 10 cm thick, consisting of crushed stone, 1.2 to 2.5 cm in diameter.

The open-graded subbase reservoir in the layer beneath the basic layer has grains 5 to 8 cm in diameter. The thickness of this layer depends on the required water storage capacity and traffic load.

If the native soils underlying the Permeable Interlocking Concrete Pavement system fails to provide adequate infiltration, the open-graded subbase reservoir may include a perforated underdrain (as shown in figure 4) to convey water out of the system.

A geotextile fabric may be placed between the open-graded subbase layer and the uncompacted subgrade soil. The purpose of the geotextile layer is to separate the sub-base reservoir from the natural soil and to prevent fines from migrating into the layers above [22].

Figure 5 presents three Lafarge Tarmac's Topmix Permeable pervious pavement systems which are available in our country as well [26].



Slika 5. Tri tipa sistema propusnog betona „Lafarge Tarmac's Topmix” propusnog betona [26]  
 Figure 5. Three „Lafarge Tarmac's Topmix” pervious concrete systems [26]

**Sistem A** omogućava da sva voda koja pada na zastor prođe kroz Topmix propusni površinski sloj i kroz donje slojeve u posteljicu.

Nešto vode može se zadržati u rezervoaru zastora pre nego što prođe u posteljicu. Sistemi potpune infiltracije ne otpuštaju dodatnu vodu u tradicionalne sisteme za odvodnjavanje. Geotekstil se može inkorporirati u sistem, u zavisnosti od posteljice.

**Sistem B** održiv je za lokacije gde podloga tj. tlo daje određeni nivo propustljivosti i gde je infiltracija prihvatljiva. U posteljicu se instaliraju odvodne cevi koje omogućavaju da sav višak vode koji ne može da prođe u zemlju, bude odveden u druge sisteme za odvodnjavanje, kao što su rečni tokovi, bare ili kanalizacija. Ovaj sistem se koristi gde podloga ne može da odvede svu vodu kao način smanjivanja otcajaja s lokacije. Geotekstil se može inkorporirati u sistem zavisno od prirode projekta.

**Sistem C** usvaja se tamo gde se želi recikliranje vode, u područjima gde postoji mogućnost kontaminacije vode ili gde je podloga nepropusna ili postaje slaba kad je zasićena. Sistem uključuje instaliranje nepropusne membrane iznad podloge i instalaciju odvodnih cevi u posteljicu. Ovo omogućava da voda bude zahvaćena i prikupljena za ponovnu upotrebu (ne kao voda za piće) već za potrebe navodnjavanja ili ispiranja toaleta. Geotekstil se može inkorporirati u sistem zavisno od prirode projekta.

#### 4 SASTAV PROPUSNOG BETONA

Propusni beton, koji se ponekad naziva „betonom bez sitnog zrna” (*engl.: no-fines concrete*) jeste mešavina cementa, krupnog agregata manje veličine, aditiva i vode. U tipičnom slučaju, propusni beton ne sadrži pesak i udeo šupljina u njemu kreće se između 15% i 30%.

Mala količina peska može se koristiti da bi se povećala čvrstoća pri pritisku, ali time će se smanjiti udeo šupljina i smanjiti propustljivost. Neophodno je održavati pravilnu količinu paste/maltera u recepturi tako da zrna agregata budu ravnomerno obavijena pastom, ali tako da višak paste/maltera ne napuni šupljine u krupnom agregatu.

**System A** allows that all water which falls on the pavement penetrates through pervious top layer and through lower layers into the subbase .

Some water can be retained in the pavement storage prior to percolating into the subbase. The full infiltration systems fail to discharge water into the traditional drainage systems. Geotextile can be incorporated into the system, depending on the subbase.

**System B** is sustainable in locations where the subgrade soil provides a certain amount of permeability and where infiltration is acceptable. Drainage pipes are installed in subbase allowing the surplus of water which cannot infiltrate the soil to discharge in alternative drainage systems such as river courses, pools or sewers. This system is typically used in locations where the soil cannot drain all water as method of reducing the runoff from the location. Geotextile can be incorporated in the system depending on the nature of the design.

**System C** is typically adopted where water recycling is desired, or where there is a potential for water contamination or subgrade soil is impervious or becomes weak when saturated. The system includes placing of impervious membrane on the soil and installation of drainage pipes in the subbase. This allows capturing water for reuse (not as potable water) but for irrigation or toilet flushing. Geotextile can be incorporated in the system depending on the nature of the design.

#### 4 PERVIOUS CONCRETE COMPOSITION

Pervious concrete, sometimes referred to as “no-fines concrete” is a mixture of hydraulic cement, coarse aggregate of smaller size, admixtures and water. Typically, pervious concrete does not contain any sand and its air void content varies between 15 and 30%.

A small amount of sand can be used for compressive strength improvement but air void content will be reduced and permeability lowered. It is important to maintain the proper volume of paste/mortar in the mix design so that the aggregate is equally coated but the excess of paste/mortar fails to fill the void space within coarse aggregate.

Voids within the pervious concrete should be

Šupljine u propusnom betonu moraju da budu povezane, tako da stvore kanale kroz koje voda može slobodno da teče [27, 28].

Ukupna poroznost propusnog betona jeste zbir zatvorene (izolovane) poroznosti i otvorene (povezane) poroznosti, i može se izračunati hidrostatičkim merenjem. Međutim, bilo bi korisno imati direktan uvid u poroznost, jer na propusnost utiče ne samo broj pora već i njihov raspored i njihova međusobna povezanost [29].

Šupljine se dalje stvaraju u krutoj cementnoj pasti koja ima nizak vodocementni faktor (w/c), a koji se obično kreće između 0.27 i 0.33. Pasta ima takvu konsistenciju da obavlja svaku česticu agregata i formira ugradljivu mešavinu koja se lako ugrađuje i koja se neće sliti sa agregata pre nego što veže beton [29]. Sadašnja istraživanja su pokazala da efikasni udeo šupljina utiče na čvrstoću pri pritisku i vodopropustljivost očvrsllog betona. Kod višeg efikasnog udela šupljina, vodopropustljivost je povećana, ali je čvrstoća pri pritisku manja. Stoga, od presudne je važnosti da se optimizuje efikasni udeo šupljina da bi se postigla odgovarajuća čvrstoća pri pritisku i propustljivost. Različita mehanička svojstva agregata takođe imaju uticaj na čvrstoću pri pritisku poroznog betona [30].

Iskustvo je pokazalo da je bolje modifikovati proporcije i svojstva agregata, kao što su: granulacija, veličina i količina, nego menjati nivo sabijanja, da bi se dobio željeni udeo šupljina [30]. U tabeli 1. dati su uobičajeni opsezi materijala za spravljanje propusnog betona.

interconnected so they create channels through which water can freely flow [27, 28].

Total porosity of pervious concrete is the sum of closed (isolated) porosity and open (connected) porosity, and it can be calculated by hydrostatic weighing. However, direct insight into porosity would be beneficial since permeability is influenced not only by the number of pores but also by their distribution and interconnectivity [29].

The voids are further created with a stiff cement paste that has a low water-to-cement (w/c) ratio typically between 0.27–0.33. The paste consistency is such that it coats each aggregate particle and creates a workable mixture that is easily placed without sloughing off the aggregates before the concrete sets [29]. Current research has shown that the effective void content affects the compressive strength and water permeability of the hardened concrete-at higher effective void contents, water permeability is increased, but the compressive strength is decreased. Thus, it is essential to optimize the effective void content in order to achieve both strength and permeability. The different mechanical properties of the aggregates also have an influence on the compressive strength of porous concrete [30].

Experience has proven that it is more beneficial to modify the aggregate proportions and properties, such as gradation, size, and amount, rather than change the level of compact effort, to reach desired void contents [30]. In table 1 there are typical ranges of materials proportions in pervious concrete.

Tabela 1. Uobičajeni\* opsezi materijala za spravljanje propusnog betona [31]\*\*  
Table 1. Typical\* Ranges of Materials Proportions in Pervious Concrete [31]\*\*

Cementni materijali <i>Cementitious materials</i>	270 do/to 415 kg/m <sup>3</sup>
Agregat <i>Aggregate</i>	1190 do/to 1480 kg/m <sup>3</sup>
Vodocementni faktor (po masi) <i>Water-cement ratio (by mass)</i>	0.27 do/to 0.30***
Proporcija agregata-cementa (po masi) <i>Aggregate-cement ratio (by mass)</i>	4 do/to 4.5:1***
Proporcija sitnog-krupnog agregata (po masi) <i>Fine-coarse aggregate ratio (by mass)</i>	0 do/to 1:1****

\* Ovo su samo informativne proporcije.

\*\* Hemijski aditivi, posebno usporivači i stabilizatori hidracije se uobičajeno koriste.

\*\*\* Korišćeni su i veći odnosi, ali to može rezultovati smanjenjem čvrstoće i trajnosti.

\*\*\*\* Dodavanjem sitnog agregata smanjiće se udeo šupljina i povećati čvrstoća pri pritisku. [31].

\* These proportions are given for information only.

\*\* Chemical admixtures, particularly retarders and hydration stabilizers, are also commonly used

\*\*\* Ratios have been used, but reductions in strength and durability may result.

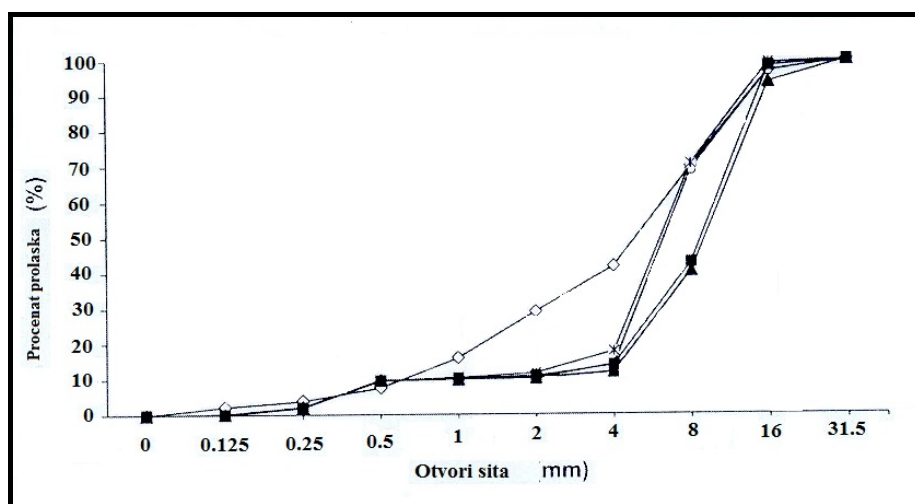
\*\*\*\* Addition of fine aggregate will decrease the void content and increase strength. [31].

Korišćenje mineralnih dodataka kao zamene dela cementa, kao što je elektrofilterski pepeo ili zgura, takođe je uobičajeno.

Jedan od primera preporučenih granulometrijskih sastava agregata pri projektovanju mešavine poroznog betona dat je na slici 6 [29].

Use of supplementary cementitious materials, such as fly ash and slag, is common as well.

One example of recommended particle size distributions of aggregate when designing mixes of porous concrete is provided in figure 6 [29].



Sika 6. Preporučene granulometrijske krive agregata [29]  
 Figure 6. Recommended particle size distributions of aggregate [29]

## 5 SVOJSTVA PROPUSNOG BETONA

U tabeli 2 date su vrednosti nekih svojstava propusnog betona za mešavine propusnog betona spravljene u laboratoriji s protocima od 700 L/m<sup>2</sup>/min [31].

Tabela 2. Vrednosti nekih svojstava propusnog betona [31]  
 Table 2. Values of some properties of pervious concrete [31]

Sleganje / <i>Slump</i>	20 mm
Jedinična težina - gustina / <i>Density</i>	1600 do / to 2000 kg/m <sup>3</sup>
Vreme vezivanja / <i>Setting time</i>	1 sat / <i>hour</i>
Poroznost / <i>Shrinkage</i>	15% do/to 25% po zapremini / <i>by volume</i>
Propustljivost / <i>Permeability</i>	120 L/m <sup>2</sup> /min do/to 320 L/m <sup>2</sup> /min
Čvrstoća pri pritisku / <i>Compressive strength</i>	3.5 MPa do/to 35 MPa
Čvrstoća na savijanje / <i>Flexural strength</i>	1 MPa do/to 3.8 MPa
Skupljanje / <i>Porosity</i>	200 x 10 <sup>-6</sup>

Vreme vezivanja propusnog betona može se produžiti na maksimum dva i po sata sa aditivima.

**Skupljanje** usled sušenja kod propusnog betona jeste brže, ali mnogo manje nego ono koje se javlja kod konvencionalnog betona. Mnogi propusni betoni se prave bez kontrolnih spojeva i dopušteno je nasumično pucanje.

**Otpornost na habanje.** Zbog grublje površinske teksture i otvorene strukture propusnog betona, habanje i krunjenje delića agregata može biti problem, posebno kada se koriste plugovi za sneg pri čišćenju podloga. Krunjenje površina na novom propusnom betonu može se dogoditi kada kamenčići koji su slabo vezani za površinu ispadnu pod opterećenjem.

Iskustvo je pokazalo da podloge od propusnog betona u **uslovima hladnog vremena** podnose cikluse smrzavanja i odmrzavanja.

## 5 PROPERTIES OF PERVIOUS CONCRETE

The values of some properties of pervious concrete in laboratory mixtures with flow rates as high as 700 L/m<sup>2</sup>/min [31] were provided in table 2.

Setting time of pervious concrete may be extended to maximum 2.5 hours with chemical admixtures.

**Shrinkage.** Drying shrinkage of pervious concrete is faster but much less than that experienced with conventional concrete. Many pervious concretes are made without control joints and are allowed to crack randomly.

**Abrasion resistance.** Because of the rougher surface texture and open structure of pervious concrete, abrasion and ravelling of aggregate particles can be a problem, particularly where snowplows are used to clear pavements. Surface ravelling in new pervious concrete can occur when rocks loosely bound to the surface pop out under traffic loads.

Experience has shown that pervious concrete pavements in **cold weather climates** tend to have an

**Otpornost propusnog betona na smrzavanje i odmrzavanje** zavisi od nivoa zasićenosti šupljina betona u vreme smrzavanja.

Terenska posmatranja pokazala su da brzo dreniranje propusnog betona sprečava pojavu zasićenosti. Poroznost propusnog betona usled postojanja velikih šupljina bitno je različita od poroznosti mikroskopskih vazдушnih pora konvencionalnog betona, koje mu omogućavaju otpornost na dejstvo mraza.

Kada su velike šupljine potpuno zasićene, smrzavanje može izazvati jako oštećenje podloge od propusnog betona. Zato je bitno zaštititi i održati šupljikavu strukturu propusnog betona da bi se obezbedila otpornost na mraz. Dosadašnje iskustvo pokazuje da se propusni beton pokriven snegom brže čisti, zato što njegove šupljine dozvoljavaju snegu da se topi brže nego što bi to bilo kod konvencionalnog betona. Mehaničko uklanjanje leda i snega može se postići korišćenjem snegočistača ili plugova. Zbog svoje krutosti, podloga od propusnog betona je manje podložna oštećenju od plugova od drugih fleksibilnih materijala [32].

Nacionalno udruženje za spravljanje betona u Americi (*engl.:The National Ready Mixed Concrete Association - NRMCA 2004*) donelo je uputstva za korišćenje propusnog betona u oblastima podložnim uticaju zamrzavanja i odmrzavanja [33]:

**Suvo zamrzavanje i duboko suvo zamrzavanje** uključuje oblasti koje podležu većem broju ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja u toku godine, ali imaju malo padavina tokom zime.

Ako zamrznuto zemljište ostaje zamrznuto kao rezultat dugog neprekidnog perioda dnevnih prosečnih temperatura ispod nule, onda se ta oblast smatra oblašću dubokog suvog zamrzavanja.

Kako propusni beton teško može biti potpuno zasićen vodom u ovim uslovima, nikakva posebna predostrožnost nije potrebna za zaštitu propusnog betona. Jedino se preporučuje da se postavi sloj čistog agregata debljine od 10 cm do 20 cm kao posteljica ispod propusnog betona i ona ima ulogu dodatnog spremišta za vodu.

**Vlažno zamrzavanje** uključuje oblasti koje podležu većem broju ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja tokom godine i koje imaju mnogo padavina tokom zime. Tlo ne ostaje zamrznuto u dugim periodima, tako da je mala verovatnoća da će propusni beton biti potpuno zasićen. Nikakva specijalna predostrožnost nije potrebna za zadovoljavajuće ponašanje propusnog betona, ali se preporučuje 10 cm do 20 cm debeo sloj čistog agregata kao posteljica ispod propusnog betona.

**Duboko vlažno zamrzavanje** nastaje gde tlo ostaje zaleđeno kao rezultat dugog neprekidnog perioda srednjih dnevnih temperatura ispod nule, što se smatra oblastima dubokog vlažnog smrzavanja. Ove oblasti mogu imati situacije u kojima propusni beton postaje potpuno zasićen. Da bi se povećala otpornost propusnog betona na smrzavanje i odmrzavanje treba preduzeti sledeće mere: korišćenje 20 do 60 cm debelog sloja čistog agregata kao posteljice ispod propusnog betona, pokušaj zaštite cementne paste ugradnjom aditiva za aeraciju u smesu propusnog betona, postavljanje perforirane PVC cevi u agregatnu posteljicu radi prikupljanja i odvoda vode. Ne zahteva svaka situacija primenu sve tri navedene metode osiguranja [13, 33].

inherent ability to withstand freeze-thaw cycles.

**Freeze-thaw resistance of pervious concrete** appears to depend on the saturation level of the voids in the concrete at the time of freezing.

Field observations have shown that the rapid draining characteristics of pervious concrete prevent saturation from occurring. The porosity of pervious concrete from the large voids is distinctly different from the microscopic air voids that provide protection to the paste in conventional concrete in a freeze-thaw environment.

When the large voids are saturated, complete freezing can cause severe damage to the pervious concrete pavement. Thus, it is critical to protect and maintain the void structure of pervious concrete in order to ensure cold weather durability. Available evidence also suggests that snow covered pervious concrete clears quicker, possibly because its voids allow the snow to melt more quickly than it would on conventional pavements. Mechanical removal of ice and snow can be accomplished using snow blowers or snow plows. Because of its rigid nature, pervious concrete pavement is actually less susceptible than other flexible paving materials to damage from snow plowing. [32].

The National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA 2004) has developed guidelines for using pervious concrete in areas prone to freeze-thaw conditions [33]:

**Dry Freeze and Hard Dry Freeze** includes areas of the country that undergo a number of freeze-thaw cycles annually but there is little precipitation during the winter.

If the ground stays frozen as a result of a long continuous period of average daily temperatures below freezing, then the area is referred to as hard dry freeze area.

Since pervious concrete is unlikely to be fully saturated in this environment, no special precaution is necessary for successful performance of pervious concrete. However, a 10 cm to 20 cm. thick layer of clean aggregate base below the pervious concrete is recommended as an additional storage for the water.

**Wet Freeze** This includes areas of the country that undergo a number of freeze-thaw cycles annually and there is precipitation during the winter. Since the ground does not stay frozen for long periods it is unlikely that the pervious concrete will be fully saturated. No special precaution is necessary for successful performance of pervious concrete but a 10 to 20 cm thick layer of clean aggregate base below the pervious concrete is recommended.

**Hard Wet Freeze** occurs in areas Certain wet freeze areas where the ground stays frozen as a result of a long continuous period of average daily temperatures below freezing are referred to as hard wet freeze areas. These areas may have situations where the pervious concrete becomes fully saturated. The following precautions are recommended to enhance the freeze-thaw resistance of pervious concrete: usage of a 20 to 60 cm thick layer of clean aggregate base below the pervious concrete, attempt to protect the paste by incorporating air-entraining admixture in the pervious mixture, placing a perforated PVC pipe in the aggregate base to capture all the water and let it drain. Not every situation warrants all the 3 safeguards [13, 33].

Pervious concrete is not recommended in freeze-



Propusni beton se ne preporučuje u oblastima smrzavanja i odmrzavanja **visokog nivoa podzemnih voda**, tj. u kojima nivo podzemnih voda raste do nivoa manjeg od 90 cm od površine ili gde vlaga može da se slije s višeg tla. [5, 34].

## 6 PROPUSNI BETON VISOKIH PERFORMANSI [35]

Propusni beton visokih performansi karakteriše: visoka čvrstoća pri pritisku, prihvatljiva hidraulička provodljivost i dobra trajnost [36].

Pri projektovanju mešavina propusnog betona visokih performansi neophodno je poštovati sledeće principe:

### 6.1 Upotreba cementne paste sa ultravisokim performansama

Pasta ultravisokih performansi menja konvencionalnu pastu za oblaganje zrna agregata i njihovo vezivanje. Ovo se može postići dodavanjem silikatne prašine i ultrafinog silikatnog praha čime se značajno poboljšava gustina pakovanja finog sistema čestica cementne paste ultravisokih performansi.

### 6.2 Povećana međuprostorna tranzitna zona između paste i agregata

Ovo se može postići dodavanjem silikatne prašine i korišćenjem posebnog tipa polikarboksilatnog etra koji je vodoupijač visokog ranga. Silikatna prašina zgušnjava pastu putem pucolanske reakcije i efekta punioca. Polikarboksilatni etar posebnog tipa može efikasno izvršiti disperziju sistema finih čestica zahvaljujući svom izbalansiranom afinitetu prema cementu, silikatnoj prašini i silikatnom prahu [37]. Ovo omogućuje vodocementni faktor od 0.2 što dovodi do zgušnjavanja mikrostrukture.

### 6.3 Optimalan odnos agregata prema vezivu (A/V) i najpovoljnija veličina zrna agregata

Propusni beton visokih performansi teži ka višoj vezivnoj čvrstoći (indirektno iskazanoj putem čvrstoće pri pritisku materijala) bez narušavanja zahteva za propuštanjem vode.

Veća količina paste (manji odnos: agregat prema vezivu) vodi ka redukciji ukupne poroznosti i hidrauličke provodljivosti, ali i ka povećanju čvrstoće pri pritisku.

Manja količina paste (veći odnos: agregat/vezivo) rezultira povećanjem ukupne poroznosti i hidrauličke provodnosti, ali i manjom čvrstoćom pri pritisku.

Veličina zrna agregata utiče na sistem pora i karakteristike propusnog betona (ukupnu poroznost, veličinu pora i distribuciju pora), pa samim tim i na njegovu čvrstoću pri pritisku i hidrauličku provodljivost [38]. Zato su optimalan odnos agregat/vezivo i adekvatno odabrana veličina agregata potrebni za zadovoljenje oba kriterijuma.

Druge pristupe kao što su:

- smanjenje odnosa između količine agregata i praškastog udela u sastavu propusnog betona;

thaw environments with **high ground water tables, i.e.** where the ground water table rises to a level less than 90cm from the top of the surface or where substantial moisture can flow from higher ground. [5, 34].

## 6 HIGH PERFORMANCE PERVIOUS CONCRETE [35]

Pervious concrete of high performances are characterized by: high compressive strength, acceptable hydraulic conductivity and good durability [36].

The following principles are followed to design high performance pervious concrete mixes:

### 6.1 Employment of optimized ultra-high performance matrix

Ultra-high performance matrix is replacing conventional matrix to cover the aggregate and bind them together. This can be achieved by adding silica fume and ultra-fine silica powder which significantly improves the packing density of the fine particle system of ultra high performance matrix.

### 6.2 Enhanced interfacial transition zone between matrix and aggregate

This is achieved through the incorporation of silica fume and the use of a special type of polycarboxylate ether which is high range water reducer. Silica fume densifies the matrix through pozzolanic reaction and filler effect. Special type polycarboxylate ether is able to efficiently disperse the fine particle system due to its balanced affinity to cement, silica fume and silica powder [37]. This enables w/ c ratio as low as 0.2 leading to densification of the microstructure.

### 6.3 Balanced aggregate to binder (A/B) ratio and tailored aggregate size

High performance pervious concrete aims at higher bond strength (indirectly evaluated by the compressive strength of the material) without sacrificing its functional requirement to allow water penetrating through.

Higher amount of matrix (lower aggregate/binder ratio) leads to reduced total porosity and hydraulic conductivity but higher compressive strength.

Lower amount of matrix (higher aggregate/binder ratio) results in increased total porosity and hydraulic conductivity but lower compressive strength.

The aggregate size affects the pore system characteristics (total porosity, pore size and its distribution) and thus the compressive strength and hydraulic conductivity [38]. Therefore a balanced aggregate/binder ratio and tailored aggregate size are necessary to satisfy both of the competing performance criteria.

Alternative approaches such as:

- reduction of ration between the amount of aggregate and powder content in composition of pervious concrete;
- addition of cementitious admixtures (SCMs),

- dodavanje dopunskih mineralnih dodataka;
  - dodavanje finog peska;
  - polimerna modifikacija cementne paste,
- istraživači su primenili s ciljem poboljšanja veze između zrna agregata, pa time i čvrstoće pri pritisku propusnog betona [35].

U tabeli 3, dat je sastav cementne paste za propusne betone raznih performansi [38].

- addition of fine sand or
- polymer modification of cement paste implemented by the researches with the goal to improve the bond between the aggregate grains, and therefore the compressive strength of pervious concrete. [35].

Table 3 features composition of cement paste for pervious concretes of diverse performances [38].

*Tabela 3. Proporcije komponenti cementne paste – matrice za propusne betone raznih performansi [35, 38]*  
*Table 3. Proportion of cement paste – matrix components of pervious concretes of diverse performances [35, 38]*

Materijali <i>Materials</i>	Proporcije u odnosu na masu <i>Proportions regarding mass</i>		
	Cementna pasta ultra-visokih čvrstoća pri pritisku <i>Cement paste of ultra-high compressive strengths</i>	Cementna pasta visokih čvrstoća pri pritisku <i>Cement paste of high compressive strengths</i>	Cementna pasta normalnih vrednosti čvrstoća pri pritisku <i>Cement paste of normal compressive strengths</i>
Cement <i>Cement</i>	1	1	1
Silikatna prašina <i>Silica fume</i>	0.25	0	0
Silikatni puder <i>Silica powder</i>	0.25	0	0
Voda <i>Water</i>	0.22	0.45	0.55
Reduktor vode velikog stepena redukcije <i>High performance water reducer</i>	0.036	0.002	0.000
Mera rasprostiranja (mm) <i>Slump (mm)</i>	340	240	220

U tabeli 4 dati su sastavi betonskih mešavina propusnih betona ultravisokih performansi.

Sastavi navedenih betonskih mešavina izraženi su preko maksimalnih veličina zrna agregata (d) i masenih odnosa agregata i praškastih delova (A/B) [38].

Na osnovu eksperimentalnih studija i parametara ispitivanih u istraživanjima autora R. Zhong i K.Wille [35,38], mogu se izvesti sledeći zaključci:

1. Korišćenjem optimizovanih cementnih pastā ultravisokih performansi (*engl.: ultra high performance matrix (UHPM)*) uz balansirani odnos agregata i veziva i odgovarajuće veličine agregata može se potencijalno unaprediti i proširiti primena propustljivih betona, a da se ne žrtvuje njegova hidraulička propustljivost, što vodi ka poroznom betonu visokih performansi (*engl.:high performance pervious concrete (HPPC)*).

2. Porozni betoni visokih performansi pokazuju veći: modul elastičnosti, kapacitet za upijanje energije i povećano linearno ponašanje pod pritiskom, u poređenju s konvencionalnim, propusnim betonom.

3. Veza između modula elastičnosti i kvadratnog korena čvrstoće pod pritiskom poroznog betona visokih performansi i poroznog betona slična je nepropusnom betonu.

Table 4 provides compositions of ultra-high performance pervious concrete mixes.

Compositions of the mentioned concrete mixtures are expressed through the aggregate size (d) and aggregate/binder ratio (A/B) [38].

Based on the experimental studies and parameters tested in the research by R. Zhong and K.Wille [35,38], the following conclusions can be drawn:

1. By using optimized ultra high performance matrix, (*UHPM*) with the tailored aggregate/binder ratio, application of pervious concretes can be potentially expanded and improved, without sacrificing its hydraulic permeability, which leads to the high performance pervious concrete (*HPPC*)).

2. High performance pervious concretes demonstrate higher: modulus of elasticity, energy absorption capacity and increased linear behaviour under pressure in comparison with the conventional, pervious concrete.

3. The relation between the modulus of elasticity and the square root of compressive strength of HPPC and porous concrete is similar to impervious concrete.

Tabela 4. Sastavi betonskih mešavina izraženih preko maksimalnih veličina zrna agregata (d) i masenih odnosa između agregata i praškastih delova u betonskoj mešavini (A/B) [38]

Table 4. Compositions of concrete mixes expressed through the aggregate size (d) and aggregate/binder ratio (A/B) [38]

Sastav betonskih mešavina propusnog betona s ciljem dobijanja propusnog betona visokih performansi Composition of pervious concrete mixes with the goal of obtaining high-performance pervious concrete			
Oznaka betonske mešavine Concrete mix identification	A/B Težinski odnos između agregata i praškastog dela u betonskoj mešavini A/B Aggregate/binder ratio	Veličina zrna agregata Aggregate size (mm)	Čvrstoća pri pritisku cementnog kamena Cement rock compressive strength (Mpa)
UHPM-2.5-1.19	2.5	1.19	174
UHPM-3.0-1.19	5.0	1.19	174
UHPM-3.5-1.19	3.5	1.19	174
UHPM-2.5-4.75	2.5	4.75	174
UHPM-3.0-4.75	3.0	4.75	174
UHPM-3.5-4.75	3.5	4.75	174

4. Kada je porozni beton pravilno projektovan, može imati čvrstoću pri pritisku veću od 50 MPa, hidrauličku provodljivost veću od 1 mm/s i zahtevanu otpornost na mraz.

5. Porozni beton visokih performansi poseduje značajno bolju otpornost na dejstvo mraza i izdržljivost nego konvencionalni propusni beton. Takođe, sposoban je da izdrži 300 ubrzanih ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja, i stoga pokazuje potencijal da bude korišćen u agresivnoj sredini poput severnih predela, gde su ciklusi smrzavanja i odmrzavanja uobičajeni.

6. Izdržljivost poroznih betona visokih performansi na dejstvo mraza može se objasniti: gušćom mikrostrukturom cementne paste i manjom količinom vode koja se može smrznuti u cementnoj pasti [38].

4. When porous concrete is correctly designed, it can have compressive strength higher than 50 MPa, hydraulic conductivity higher than 1 mm/s and the required frost resistance.

5. HPPC features a considerably higher resistance to frost-thaw action than conventional pervious concrete. Also, it is capable of withstanding 300 accelerated freezing-thawing cycles and IT demonstrates potential to be used in an aggressive environment, such as far-north areas where freezing-thawing cycles are common.

6. Durability of HPPC to frost action can be explained by: denser microstructure of cement paste and smaller amount of water that could freeze in the cement matrix [38].

## 7 ZAKLJUČCI

Osnovna primena propusnog betona jeste upravljanje oticanjem atmosferske vode (*engl.: stormwater runoff managment – SWM*). U tome se i ogleda veliki ekološki značaj propusnog betona. Eliminacijom površinskog oticaja, propusni betoni projektovani kao odvodni sistemi, eliminišu površinski tok oticaja koji spira otpad i krupna tela u odvode atmosferskih voda i površinske vodene receptore. Propusni beton, koji se ponekad naziva „betonom bez sitnog zrna“ (*engl.: no-fines concrete*) jeste mešavina cementa, krupnog agregata manje veličine, aditiva i vode. U tipičnom slučaju, propusni beton ne sadrži pesak, i udeo šupljina u njemu se kreće između 15 i 30%.

Pri projektovanju mešavina propusnog betona visokih performansi neophodno je poštovati određene principe, kao što su: upotreba paste ultravisokih performansi, uvećana međuprostorna tranziciona zona između paste i agregata, izbalansiran odnos agregata prema vezivu i najpovoljnija veličina zrna agregata. Hidrološke performanse obično su ključni parametar u odluci da se ovaj materijal koristi u praksi, a s ciljem najboljeg upravljanja oticanjem atmosferskih voda tj. kišnice [39, 40, 41].

## 7 CONCLUSIONS

The primary application of pervious concrete is stormwater runoff management – SWM. This reflects the great environmental importance of pervious concrete. By eliminating surface runoff, pervious concrete designed as drainage conveyance eliminates sheet flow runoff that flushes trash and gross solids into storm sewers and surface receiving waters. Pervious concrete, sometimes referred to as “no-fines concrete” is a mixture of hydraulic cement, coarse aggregate of smaller size, admixtures and water. Typically, pervious concrete is without sand and its air void content varies between 15 and 30%.

When designing high performance pervious concrete mixtures, certain principles should be followed, such as: employment of ultra high performance matrix, enhanced interfacial transition zone, and balanced aggregate to binder ratio and tailored aggregate size. Hydrologic performance is usually a key parameter in the decision to use this material in practice, with the goal of best storm water management [39, 40, 41].

## ZAHVALNOST

Ovaj rad predstavlja deo istraživanja obavljenog u okviru projekta TR 36017 „Istraživanje mogućnosti primene otpadnih i recikliranih materijala u betonskim kompozitima, sa ocenom uticaja na životnu sredinu, u cilju promocije održivog građevinarstva u Srbiji”, koji je podržalo Ministarstvo za nauku i tehnologiju Republike Srbije. Na ovoj podršci duboko zahvaljujemo.

## 8 LITERATURA REFERENCES

- [1] C. Lian, Y. Zhuge, Optimum mix design of enhanced permeable concrete – An experimental investigation, *Construction and Building Materials*, 24 (2010) 2664–2671
- [2] Pervious Concrete Pavement Maintenance Guidelines, National Ready Mixed Concrete Association 900 Spring Street Silver Spring, MD 20910
- [3] Specifier's Guide for Pervious Concrete Pavement Design, Colorado Ready Mixed Concrete Association 6855 South Havana Street Suite 540, Version 1.2
- [4] M. Vancura, K. MacDonald, L. Khazanovich, Microscopic analysis of paste and aggregate distresses in pervious concrete in a wet, hard freeze climate, *Cement and Concrete Composites* 33 (2011) 1080–1085
- [5] Preuzeto: <http://www.perviouspavement.org/design/hydrologicaldesign.html>, datum: 10.01.2016.
- [6] Preuzeto: <http://www.hotfrog.com.au/business/hydroston-permeable-concrete-pavers-138288>, datum 10.01.2016.
- [7] Preuzeto: <http://www.tarmac.com/solutions/readymix/topmix-permeable/>, datum: 10.01.2016.
- [8] Preuzeto: <http://www.sdrmca.org/page-954584>, datum: 10.01.2016.
- [9] E. Guneyisi, M. Gesoglu • Q. Kareem • S. Ipek, Effect of different substitution of natural aggregate by recycled aggregate on performance characteristics of pervious concrete, *Materials and Structures* (2016) 49:521–536
- [10] National Research Council report, Urban Stormwater Management in the United States, The National Academies Press Washington, D.C., October 15, 2008
- [11] Preuzeto: <http://www.nrmca.org/research/cif%20winter%2008%20perv%20conc%20leed.pdf>, datum: 10.01.2016.  
Erin Ashley, PhD, Director of Codes and Sustainability, NRMCA, Using Pervious Concrete to Earn LEED Points, WINTER 2008, tech talk
- [12] *Pervious Concrete Mixtures and Properties*, PCA Concrete Technology Today, CT043, December 2004, 2 pages, PDF, preuzeto: <http://www.cement.org/docs/default-source/sustainability2/pervious-concrete-mixtures-and-properties-ct043.pdf?sfvrsn=6>, datum: 10.01.2016.
- [13] *Pervious Concrete Pavement: A Win-Win System*, D. Brown, PCA Concrete Technology Today, CT032, August 2003, 3 pages, PDF, preuzeto: <http://www.cement.org/docs/default-source/sustainability2/pervious-concrete-pavement-a-win-win-system-ct032.pdf?sfvrsn=4>, datum: 10.01.2016.
- [14] N. Delatte, F. S. Schwart, Sustainability Benefits of Pervious Concrete Pavement, Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies June 28 - June 30, 2010, Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italy.
- [15] Pervious Paving: A Deeper Look, <http://www.cement.org/for-concrete-books-learning/materials-applications/pervious-concrete/technical-information-on-pervious-paving>
- [16] Preuzeto: <http://www.landscapeonline.com/research/article/17729>, datum: 10.01.2016.
- [17] Preuzeto: <http://www.cement.org/think-harder-concrete-homes/technology-briefs/permeable-interlocking-concrete-pavement>, datum: 10.01.2016.
- [18] Preuzeto: <http://www.landscapeonline.com/research/article/18369>, datum: 10.01.2016.
- [19] Preuzeto: <http://landscapeonline.com/research/article/14041>, datum: 10.01.2016.
- [20] Preuzeto: <http://landscapeonline.com/research/article/9752>, datum: 10.01.2016.
- [21] Preuzeto: <http://www.landscapeonline.com/research/article/10426>, datum: 10.01.2016.
- [22] Preuzeto: <http://www.dreamstime.com/stock-photography-worker-paving-new-parking-places-concrete-grid-pavers-can-be-filled-soil-grass-growth-aggregate-drainage-image33467732>, datum: 10.01.2016.
- [23] Preuzeto: <http://eaglebaypavers.com/paver-looks/pavers-with-grass/>, datum: 10.01.2016.
- [24] Smith, David R. 2011., *Permeable Interlocking Concrete Pavements*, 4th edition. Interlocking Concrete Pavement Institute (ICPI), Herndon, VA, USA.
- [25] U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, *Permeable Interlocking Concrete Pavement*, TechBrief, Publication Number FHWA-HIF-15-007 | JANUARY 2015.
- [26] Preuzeto: <http://www.tarmac.com/media/492738/hydramediabrochure28pp-rebranded-lowres1.pdf>, datum: 10.01.2016.
- [27] A Guide to Pervious Concrete, SIKA USA, bro-cpd-PerviousConcrete-us

## ACKNOWLEDGEMENTS

The work reported in this paper is a part of investigation within the research project TR 36017 „Utilization of by - products and recycled waste materials in concrete composites in the scope of sustainable construction development in Serbia: investigation and environmental assessment of possible applications“ supported by Ministry for Science and Technology, Republic of Serbia. This support is gratefully acknowledged.

- [28] Tennis, Paul, D.; Leming, Michael, L.; and Akers, David, J., Pervious Concrete Pavements, EB302, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, and National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, USA, 2004, 36 pages.
- [29] K. Čosić, L. Korat, V. Ducman, I. Netinger, Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete, *Construction and Building Materials* 78 (2015) p.p.69–76
- [30] L. K. Crouch, P.E.; Jordan Pitt; and Ryan Hewitt, Aggregate Effects on Pervious Portland Cement Concrete Static Modulus of Elasticity, *Journal of materials in civil engineering* © ASCE / July 2007 / p.p.561- 568
- [31] Portland cement association, *Concrete technology today*
- [32] Preuzeto:<http://www.cement.org/for-concrete-books-learning/materials-applications/pervious-concrete/pervious-concrete-and-freeze-thaw>, datum: 10.01.2016.
- [33] Freeze Thaw Resistance of Pervious Concrete (2004) National Ready Mixed Concrete Association, 17 pages, preuzeto: <http://www.nrmca.org/greenconcrete/nrmca%20-%20freeze%20thaw%20resistance%20of%20pervious%20concrete.pdf>, datum: 10.01.2016.
- [34] J. S. Gulliver, Principal Investigator Department of Civil, Environmental, and Geo- Engineering University of Minnesota, *Permeable, Pavements in Cold Climates: State of the Art and Cold Climate Case Studies*, June 2015
- [35] R. Zhong, K. Wille, Material design and characterization of high performance pervious concrete, *Construction and Building Materials* 98 (2015) p.p. 51–60
- [36] Preuzeto:<http://digitalcommons.uconn.edu/dissertations/659/>, datum: 10.01.2016.  
R. Zhong, „Design, Characterization and Modeling of High Performance Pervious Concrete“, University of Connecticut – Storrs, Doctoral dissertations, 2015.
- [37] C. Schröfl, M. Gruber, J. Plank, Preferential adsorption of polycarboxylate superplasticizers on cement and silica fume in ultra-high performance concrete (UHPC), *Cem. Concr. Res.* 42 (2012) p.p.1401–1408.
- [38] R. R. Zhong, K. Wille, Compression response of normal and high strength pervious concrete, *Construction and Building Materials* 109 (2016) p.p. 177–187
- [39] D. Bjegović, M. Serdar, M. Jelčić Rukavina, A. Baričević, M. Pezer „Possibilities in concrete industry towards circular economy through industrial symbiosis“, *Building materials and structures* 57 (2014) 4 (31-42)
- [40] Storm Water Management by Pervious Concrete, preuzeto:<http://www.cement.org/for-concrete-books-learning/materials-applications/pervious-concrete/storm-water-management>, datum: 10.01.2016.
- [41] Report on pervious concrete, CI 522R-10. Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute; 2010. 38p.

## REZIME

### EKOLOŠKI ZNAČAJ, SASTAV I SVOJSTVA PROPUSNOG BETONA

Gordana TOPLIČIĆ-ĆURČIĆ  
Dušan GRDIĆ  
Nenad RISTIĆ  
Zoran GRDIĆ

Porozni ili propusni beton u upotrebi je još od šezdesetih godina prošlog veka. Prvo se počeo primenjivati u Americi, a zatim i u Evropi. Ekološki značaj propusnog betona ogleda se u brzom prikupljanju vode nakon obilnih kiša s trotoara, parkinga i drugih nepropusnih površina. Voda koja se prikuplja sadrži štetne sastojke koji se specijalnim sistemima odstranjuju. Takva voda se može koristiti za druge svrhe.

Propusni beton sadrži malo ili gotovo nimalo sitnog agregata. Njegova poroznost je velika i kreće se u rasponu od 15% do 30% u odnosu na zapreminu betona.

Pre nego što je propusni beton počeo masovnije da se koristi, bilo je potrebno dokazati tj. ispitati njegova svojstva u uslovima eksploatacije. U radu je obrazložena ekološki značaj propusnog betona, dati su njegov uobičajen sastav i njegova svojstva.

**Cljučne reči:** porozni beton, ekologija, sastav, svojstva

## SUMMARY

### ENVIRONMENTAL IMPORTANCE, COMPOSITION AND PROPERTIES OF PERVIOUS CONCRETE

Gordana TOPLIČIĆ-CURČIĆ  
Dusan GRDIĆ  
Nenad RISTIĆ  
Zoran GRDIĆ

Porous or pervious concrete was in use since the 60's of the previous century. It was first used in the USA and afterwards in Europe. The environmental importance of pervious concrete can be seen through fast collection of stormwater from the pavements, parking lots and other impervious surfaces. Special purification systems remove the detrimental matter from the collected stormwater. As such, it can be used for other purposes.

The pervious concrete has little or almost no fine aggregates. Its porosity is high, and ranges between 15 and 30 % in comparison to the concrete volume.

Prior to massive usage of pervious concrete, it was necessary to prove, i.e. to examine its properties in service conditions. The paper elucidates the environmental character of pervious concrete, provides its usual composition and its properties.

**Key words:** porous concrete, ecology, composition, properties



# PROCES HIDRATACIJE I ČVRSTOĆA PRI PRITISKU CEMENTNIH PASTA KOJE SADRŽE PRIRODNI ZEOLIT

## HYDRATION PROCESS AND COMPRESSIVE STRENGTH OF CEMENT PASTES CONTAINING NATURAL ZEOLITE

Miroslava RADEKA  
Tiana MILOVIĆ  
Mirjana MALEŠEV  
Vlastimir RADONJANIN  
Mirjana LABAN

ORIGINALNI NAUČNI RAD  
ORIGINAL SCIENTIFIC PAPER  
UDK: 666.942:549.67  
doi:10.5937/grmk1602029R

### 1 UVOD

Beton je jedan od najznačajnijih građevinskih materijala, koji bolje nego bilo koji drugi materijal može da prilagodi svoja svojstva unapred definisanim zahtevima, ukoliko su oni definisani kao realan skup performansi. Ali upravo zbog njegove atraktivnosti često se zanemaruje činjenice da beton ima enorman uticaj na životnu sredinu. Prvo, ogromna količina prirodnih resursa je potrebna za proizvodnju milijardi tona betona godišnje. Drugo, cement predstavlja komponentu betona koja se u svetu najviše proizvodi i koristi (1.6 milijardi tona godišnje) [1]. Zatim, cementna industrija ima vodeću ulogu u globalnom zagrevanju, i odgovorna je za 7% ukupne emisije CO<sub>2</sub> [1]. Kako bi se smanjila potrošnja električne

### 1 INTRODUCTION

Concrete is up to now the most significant engineered building material whose properties could be tailored to satisfy almost any reasonable set of performances, more than any other building material. But this attractiveness very often entails the neglect of the fact that it has an enormous impact on the environment. First, there are huge amounts of natural resources needed to produce billions of tones of concrete each year. Then, cement as one of the concrete components is worldwide the most produced and used material (1.6 billion tons per annum) [1]. Therefore, the cement industry has a leading role in global warming, with responsibility of 7% of the total CO<sub>2</sub>

---

Prof. dr Miroslava Radeka, dipl. inž. tehn. Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka - Departman za građevinarstvo i geodeziju, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad, e-mail: [mirka@uns.ac.rs](mailto:mirka@uns.ac.rs)  
MSc. Tiana Milović, mast. inž. građ. Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka - Departman za građevinarstvo i geodeziju, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad, e-mail: [tiana.milovic@uns.ac.rs](mailto:tiana.milovic@uns.ac.rs)  
Prof. dr Mirjana Malešev, dipl. inž. građ. Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka - Departman za građevinarstvo i geodeziju, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad, e-mail: [miram@uns.ac.rs](mailto:miram@uns.ac.rs)  
Prof. dr Vlastimir Radonjanin, dipl. inž. građ. Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka - Departman za građevinarstvo i geodeziju, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad, e-mail: [radonv@uns.ac.rs](mailto:radonv@uns.ac.rs)  
Prof. dr Mirjana Laban, dipl. inž. građ. Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka - Departman za građevinarstvo i geodeziju, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad, e-mail: [mlaban@uns.ac.rs](mailto:mlaban@uns.ac.rs)

---

Prof. Dr. Miroslava Radeka, B.E. Tech. University of Novi Sad, Faculty of Technical sciences-Department of Civil Engineering and Geodesy, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad, e-mail: [mirka@uns.ac.rs](mailto:mirka@uns.ac.rs)  
MSc. Tiana Milović, MCE. University of Novi Sad, Faculty of Technical sciences-Department of Civil Engineering and Geodesy, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad, e-mail: [tiana.milovic@uns.ac.rs](mailto:tiana.milovic@uns.ac.rs)  
Prof. Dr. Mirjana Malešev, BCE, University of Novi Sad, Faculty of Technical sciences-Department of Civil Engineering and Geodesy, Trg Dositeja Obradovica 6, Novi Sad, e-mail: [miram@uns.ac.rs](mailto:miram@uns.ac.rs)  
Prof. Dr. Vlastimir Radonjanin, BCE, University of Novi Sad, Faculty of Technical sciences-Department of Civil Engineering and Geodesy, Trg Dositeja Obradovica 6, Novi Sad, e-mail: [radonv@uns.ac.rs](mailto:radonv@uns.ac.rs)  
Prof Dr Mirjana Laban, BCE, University of Novi Sad, Faculty of Technical sciences-Department of Civil Engineering and Geodesy, Trg Dositeja Obradovica 6, Novi Sad, e-mail: [mlaban@uns.ac.rs](mailto:mlaban@uns.ac.rs)

energije i emisija CO<sub>2</sub>, uvodi se delimična zamena portland cementa (PC) dopunskim cementnim materijalima (u daljem tekstu DCM). Njihova upotreba ima ekonomsku, ekološku i tehničku prednost. DCM obuhvataju širok spektar prirodnih pucolana i nusprodukata iz industrije. Prirodni zeoliti pripadaju grupi prirodnih pucolana, kao i grupi DCM.

Prirodni zeoliti (PZ) jesu mikroporozni, kristalni, hidratirani aluminosilikatni minerali sa otvorenom, trodimenzionalnom kristalnom rešetkom koja se sastoji od tetraedara silicijum-oksida [SiO<sub>4</sub>]<sup>4-</sup> i aluminijum-oksida [AlO<sub>4</sub>]<sup>5-</sup> [2, 3]. Kristale karakteriše „sačasta“ struktura s malim porama i kanalima, koja obezbeđuje veliku unutrašnju i spoljašnju specifičnu površinu [4, 5]. Upravo ta velika specifična površina jeste osnova za veliku reaktivnost PZ [5].

Kada se voda doda u suhu mešavinu cementa i DCM, počinje hidratacija cementa i formiranje različitih produkata hidratacije kao što su C-S-H i C-A-H gelovi, AFm, AFt faze, kalcijum-hidroksid (CH), i tako dalje. Pucolanska reakcija DCM predstavlja kompleksan proces koji se odvija u prisustvu kalcijum-hidroksida (Ca(OH)<sub>2</sub>) ili Ca<sup>2+</sup> jona i vode. Razlaganje DCM počinje od površine njihovih zrna pod uticajem hidroksilnih jona (OH<sup>-</sup>). Pokretačku snagu čini razlika u Gibbs-ovoj energiji između reaktanata i produkata hidratacije. Otpuštanje ili razlaganje prvenstveno silike iz DCM u nekom trenutku dovodi do zasićenja pornog rastvora. Tada započinje proces heterogene nukleacije, koji je praćen rastom C-S-H produkata na površini zrna DCM-a. Formiranje C-S-H sloja, koji obavlja površinu zrna utiče na dalju brzinu reakcije. Naime, rast i povećanje gustine sloja koji čine produkti hidratacije može da spreči difuziju hidroksilnih jona ka neizreagovanoj fazi i dovede do smanjenja brzine reakcije. Produkti hidratacije veziva koje se sastoji od običnog portland cementa i DCM, razlikuju se od produkata hidratacije PC-a. Produkte hidratacije mešavine PC-a i DCM po pravilu čine C-(A)-S-H, AFm faze i etringit. U slučaju DCM bogatih MgO, mogu da se jave i hidratirane faze na bazi hidrotalcita. C-S-H faza značajno je drugačija od one nastale u pastama/malterima/betonima na bazi PC-a. Odnos Ca/Si manji je usled smanjenja količine portlandita, kao i zbog veće raspoloživosti Si i Al jonima koji potiču iz rastvorenih DCM. C-S-H faza s nižim odnosom Ca/Si obično ima strukturu nalik tobermoritovom gelu [6]. Prosečna dužina lanca se povećava sa smanjenjem odnosa Ca/Si. U tom slučaju, aluminijum može ući u strukturu tobermorita i formirati C-(A)-S-H. Upravo formiranje C-(A)-S-H faze dovodi do povećanog vezivanja alkalija, zbog negativnog naelektrisanja strukture i u skladu s navedenim, smanjuje se pH vrednost pornog rastvora. Značajan pad pH vrednosti pornog rastvora ispod 10 može u velikoj meri da utiče na smanjenje brzine pucolanske reakcije što dalje može da dovede do destabilizacije AFm i AFt produkata reakcije. Takođe, sa smanjenjem odnosa Ca/Si menja se morfologija C-S-H faze, od vlaknastih čestica do listaste forme [7].

Kada se upotrebljava prirodni zeolit kao DCM, treba očekivati pucolansku reakciju koja se razlikuje od ostalih iz sledećih razloga:

- struktura zeolita apsorbuje značajnu količinu vode;
- difuzija negativno naelektrisanih hidroksilnih jona kroz pore zeolita otežana je zbog negativno naelektri-

emission [1]. In order to reduce energy consumption and CO<sub>2</sub> emission, partial replacement of Portland cement (PC) with supplementary cementitious materials (which will be referred to as SCMs) has been used. The advantages of their use are economic, environmental and technical. SCMs comprise a wide variety of natural pozzolans and by-products of industries. Natural zeolites belong to the group of natural pozzolans, and the group of SCMs.

Natural zeolites (NZs) are microporous, crystalline, hydrated aluminosilicate minerals with an open, three-dimensional framework of silicon-oxygen [SiO<sub>4</sub>]<sup>4-</sup> and aluminium-oxygen [AlO<sub>4</sub>]<sup>5-</sup> tetrahedra [2,3]. Crystals are characterized by a honeycomb-like structure with small pores and channels that provide large internal and external surface areas [4,5]. The high specific surface area of NZ represents the base of its high reactivity [5].

When water is added to dry mixture of cement and SCM it initiates cement hydration and formation of different hydrated products like C-S-H and C-A-H gels, AFm, AFt phases and calcium hydroxide (CH), etc. The pozzolanic reactions of SCMs represent a complex process which starts in the presence of calcium hydroxide (Ca(OH)<sub>2</sub>) or Ca<sup>2+</sup> ion and water. The decomposition of SCMs begins on the surface of their grains under the attack of hydroxyl ion (OH<sup>-</sup>). The driving force is the difference in Gibbs energy between the reactants and hydrated products. The release or dissolution primarily of silica from the SCMs will lead to saturation of pore solution at some point. Consequently, heterogeneous nucleation starts and it is followed by the growth of C-S-H products at the SCMs grain surface. The formation of the C-S-H layer, which encircles the surface of the SCM grain, will influence further the rate of reaction. Namely, the growth and densification of the layer made of hydrated products would hamper the diffusion of hydroxyl ions towards the unreacted phases and cause the decrease of the rate of reaction. Hydration products of binder that contain ordinary Portland cement (PC) and a SCM differ in comparison with hydration products of PC. The hydration products of the binders consisting of PC and SCM generally contain C-(A)-S-H, AFm-type phases and ettringite. Those SCMs abounding in MgO could have hydrotalcite-type hydrated phases. The C-S-H phase is significantly different than in pastes/mortar/cement based on PC. The ratio of Ca/Si is lower due to the decrease of the amount of portlandite and due to the larger availability of Si and Al ions originating from dissolving of SCMs. The C-S-H phase with lower Ca/Si ratio usually has tobermorite-like structure [6]. The average chain length increases when the Ca/Si ratio decreases. In such case the uptake of aluminium is increased and C-(A)-S-H is formed. The formation of C-(A)-S-H phase leads to an increased uptake of alkalis due to negatively charged structure and, accordingly, to the decrease of pore solution pH value. A significant drop in pore solution pH below 10 could affect a decrease in pozzolanic reaction rate, furthermore it can also lead to the destabilization of AFm and AFt reaction products. Also, the morphology of C-S-H phase is changed from fibrillar particles to sheet-like two dimensional foils when the Ca/Si ratio decreases [7].

When zeolite is used as SCM it should be expected that pozzolanic reaction is going to be more specific due to the following reasons:



sane kristalne rešetke zeolita;

- izmenljivi katjoni koji se nalaze u strukturi zeolita mogu da utiču na pucolansku reakciju zeolita i odnos Ca/Si u C-S-H fazi.

Zeolit može da apsorbuje veliku količinu vode unutar svoje strukture. Priilikom razgradnje kristalne strukture zeolita oslobađa se ova voda koja može da ima dvostruku ulogu u pucolanskoj reakciji. Prva je doprinos procesu hidratacije u slučaju kada je količina vode u sistemu pora kod paste smanjena, a druga je smanjenje pH vrednosti usled efekta razblaživanja.

Pucolanska reakcija pod uticajem hidroksilnih jona odvija se kroz disocijaciju Si-OH i Al-OH u Si-O i Al-O grupe.  $Ca^{2+}$  iz rastvora zasićenog portlanditom adsorbuju se na površini. Pretpostavlja se da prisustvo Si-O i Al-O grupa utiče na dalju razgradnju veza Si-O-Si i Al-O-Si grupa koje se nalaze ispod njih u rešetki zeolita. Negativno naelektrisanje rešetke zeolita sprečava difuziju hidroksilnih jona dublje u strukturu zeolita. Ovaj proces prvenstveno zavisi od koncentracije Si-O i Al-O grupe na površini, zbog čega proces rastvaranja zavisi od specifične površine.

Uloga izmenjivih katjona u pucolanskoj reakciji zeolita veoma je značajna. Oni mogu da utiču na stepen hidratacije, nivo polimerizacije kao i na morfologiju C-S-H faze [8]. Na primer, jon  $Na^+$  brže se otpušta u porni rastvor i tako se povećava njegova pH vrednost. Usled toga se povećava rastvorljivost i reaktivnost zeolita. Takođe, prisustvo jona  $Na^+$  može da utiče na formiranje C-S-H faze u obliku lista, s većim stepenom uređenosti rešetke i krupnijim kristalima. Ove pojave dovode do formiranja strukture veće propusnosti, a samim tim zeolit postaje reaktivniji.

Zeolit sa  $Ca^{2+}$  kao izmenjivim katjonom imao bi manju potrošnju portlandita nastalog u procesu hidratacije cementa. Neizreagovani portlandit može da iskristališe i formira ogromne kristale koji mogu da smanje mehanička svojstva pastā/maltera/betona [9].

Sve navedene činjenice ukazuju na kompleksnost mehanizma pucolanske reakcije zeolita i potrebu da se ovaj proces ispita kako bi se razumeo i stavio pod kontrolu.

Značaj razumevanja i sticanje dubljeg uvida u mehanizme pucolanske reakcije zeolita proizlazi na prvom mestu iz povećanja trajnosti. Povećanje trajnosti maltera/betona spravljenih sa zeolitom kao DCM-om utvrđuje se preko smanjenja poroznosti, povećanja hemijske otpornosti i većeg sadržaja C-S-H faze. Dodatno, njegov uticaj na životnu sredinu ( $Cr^{6+}$  adsorpcija, antibakterijski materijal i materijal za kontrolisanje vlažnosti), katalitičko svojstvo (velika specifična površina, jonoizmenjivački kapacitet i poroznost), ekonomska pogodnost (niski troškovi proizvodnje), kao i široka rasprostranjenost jesu od velikog značaja za njegovu primenu. Glavni depoziti zeolita u Srbiji visokog su kvaliteta i sadrže više od 70% zeolita (npr. Beočin, Igroš, Jablanica 1, Toponica, Zlatokop) [10].

Glavni cilj ovog rada je prikaz rezultata ispitivanja teksturalnih, mineraloških i mehaničkih svojstava cementnih pasta spravljenih s različitim količinama zeolita (0%, 10%, 20% i 30%) kao DCM. Napredak procesa hidratacije kod uzoraka pastā praćen je nakon 28 i 60 dana.

- zeolite structure absorbs significant amount of water,

- diffusion of negatively charged hydroxyl ions into the zeolite pore network is hindered by negatively charged zeolite framework,

- exchangeable cations from zeolite structure could affect the pozzolanic reaction of zeolite and Ca/Si ratio in C-S-H phase.

Zeolite can absorb a great amount of water in pore structure. While zeolite structure framework is being degraded, this water is released and it could have double function in the pozzolanic reaction. The first one is contribution to hydration process in case the amount of water in the pore system of "binder" paste has decreased, and second one could be a decrease of pH value as dilution effect.

The pozzolanic reaction of zeolite under the action of hydroxyl ions proceeds by dissociation of Si-OH and Al-OH into Si-O and Al-O groups.  $Ca^{2+}$  cations from the portlandite saturated solution are adsorbed on the surface. The presence of Si-O and Al-O groups is assumed to influence the further degradation of Si-O-Si and Al-O-Si bonds underlying in zeolite framework. The negative zeolite framework charge impedes the diffusion of hydroxyl ions deep into zeolite framework. This process mostly depends on the concentration of Si-O and Al-O groups on the surface, which makes the dissolution process dependent on specific surface area.

The role of the type of exchangeable cations in pozzolanic reaction of zeolite is very important. They may influence the rate of hydration, the degree of polymerization as well as morphology of C-S-H phase [8]. For instance  $Na^+$  ion is faster released into the pore solution and therefore increases pH value. Accordingly, zeolite dissolution and reactivity will increase. Also the presence of  $Na^+$  ion can influence the formation of foil like morphology of C-S-H phase, with a higher degree of ordering and larger crystals. This will lead to the formation of a structure with a higher permeability and consequently a higher zeolite reactivity.

Zeolite with  $Ca^{2+}$  as an exchangeable cation will have lower consumption of portlandite produced in the process of cement hydration. Unreacted portlandite may crystallize and form massive crystals which could decrease mechanical properties of paste/mortar/concrete [9].

All the mentioned facts indicate the complexity of the mechanism of zeolite pozzolanic reaction and the necessity to investigate this process in order to understand and control it.

The significance of understanding the process of zeolite pozzolanic reaction and gaining more fundamental insight into the reaction mechanisms arises in the first place from the increased durability. The increased durability of mortar/concrete made of zeolite used as a SCM is recognised through their reduced porosity, increased chemical resistance and higher content of C-S-H phase. Additionally, their environmental impact ( $Cr^{6+}$  adsorption, anti-bacterial and humidity-conditioning material), catalytic (high specific area, cation exchange capacity and porosity), economical (low cost of production), as well as widespread presence are very important for their application. The main zeolite deposits in Serbia are of high quality containing more than 70% of zeolites (e.g. Beočin, Igroš, Jablanica 1,

Toponica, Zlatokop) [10].

The aim of this paper is to present the results of textural, mineralogical and mechanical properties obtained for cement based pastes prepared with different amounts of zeolite (0%, 10%, 20% and 30%) as SCM. The progress of hydration process has been followed for paste samples 28 and 60 days old.

## 2 EKSPERIMENTALNI DEO

### 2.1 Materijali i sastav mešavina

U okviru istraživanja prikazanog u ovom radu kao material je korišćen portland cement, CEM I 42.5 (Lafarge, Beočin, Srbija) i prirodni zeolit, PZ, ( $d < 125 \mu\text{m}$ ) iz nalazišta Igroš (Brus, Srbija). CEM I 42.5 ispunjava kriterijume standarda SRPS EN 197-1.

Referentna i tri dodatne mešavine portland cementne paste, koje sadrže 10%, 20% i 30% PZ u odnosu na masu cementa (uzorci C, CZ10, CZ20 i CZ30, prema navedenom redosledu) spravljene su sa dejonizovanom vodom, W/B=0.5 (Tab. 1). Uzorci pastā su dimenzija 1x1x6 cm.

## 2 EXPERIMENTAL

### 2.1 Materials and mixture proportions

The materials used in this study are Portland cement, CEM I 42.5 (Lafarge, Beočin, Serbia) and natural zeolite ( $d < 125 \mu\text{m}$ ) from Igroš quarry (Brus, Serbia). CEM I 42.5 meets the criteria of standard SRPS EN 197-1.

Reference and three additional mixtures of Portland cement paste, containing 10%, 20% and 30% of NZ per cement weight (samples C, CZ10, CZ20 and CZ30, respectively) have been prepared with the addition of deionized water, W/B=0.5, Tab. 1. The dimensions of paste samples have been 1x1x6 cm.

Tabela 1. Sastav mešavina cementnih i cementno-zeolitnih pastā [11]  
Table 1. Mixture proportions for cement and cement-zeolite pastes [11]

Sastav mešavina / Mixture proportions				
	C	CZ10	CZ20	CZ30
CEM I 42.5	450g	405g	360g	315g
Prirodni zeolit <i>Natural zeolite</i>	-	45g	90g	135g
Dejonizovana voda <i>Deionized water</i>	225g	225g	225g	225g
w/b faktor <i>w/b ratio</i>	0.5	0.5	0.5	0.5

### 2.2 Metode

#### 2.2.1 Hemijska analiza

Hemijski sastav PZ određen je u skladu sa standardom SRPS EN 196-2.

#### 2.2.2 Mineraloška karakterizacija

XRD difrakcioni praškasti paterni snimani su na Philips-ovom difraktometru tipa PW-1710 pri čemu je korišćena bakarna antikatoda sa  $\text{CuK}\alpha=1.54128\text{\AA}$  i grafitni monohromator. XRD analiza je izvedena pod uglom od  $2\theta(^{\circ})$  u opsegu od  $5^{\circ}$  do  $50^{\circ}$  s korakom  $0.02^{\circ}$ . Identifikacija postojećih mineralnih faza izvedena je upoređivanjem interpolirane razdaljine ( $d$ ) i relativnog intenziteta ( $I$ ) s podacima iz literature, ili odgovarajuće kartice iz JCPDS fajlova.

Za spektroskopsku karakterizaciju pripremljeni su uzorci pastā i izvedeno je snimanje infracrvenom spektroskopijom s Furijeovom transformacijom (Thermo-Nicolet Nexus 670 FTIR spektrometar), s ciljem da se izuče vibraciona svojstva navedenih uzoraka. FTIR

### 2.2 Methods

#### 2.2.1 Chemical analysis

The chemical composition of NZ has been determined according to SRPS EN 196-2.

#### 2.2.2 Mineralogical characterization

The XRD powder diffraction patterns have been acquired on Philips X-ray powder diffractometer type PW-1710 using copper anticathode with  $\text{CuK}\alpha=1.54128\text{\AA}$  and graphite monochromator. Powder XRD analyses have been performed in the  $2\theta(^{\circ})$  angle range from  $5^{\circ}$  to  $50^{\circ}$  with a  $0.02^{\circ}$  step in experiments. The identification of the existing mineral phases has been acquired by comparing interpolate distances ( $d$ ) and relative intensities ( $I$ ) with literature data, or the appropriate card from the JCPDS files.

For the spectroscopic characterization of the prepared paste samples, the Fourier Transform Infra-Red (FTIR) analyses have been carried out (Thermo-Nicolet Nexus 670 FTIR spectrometer) in order to study vibration properties of the prepared samples. The FTIR

spektri snimljeni su sa spektralnom rezolucijom od  $4\text{ cm}^{-1}$  u opsegu od 400 do  $4000\text{ cm}^{-1}$ , s prosečno 32 skeniranja po jednom merenju. Spektri svih ispitanih uzoraka određeni su korišćenjem tehnika KBr pastille. Jedna od prednosti upotrebe FTIR spektroskopije jeste mogućnost izučavanja vibracionih svojstava kako amorfnih tako i kristalnih uzoraka [12].

### 2.2.3 Teksturalna karakterizacija

Niskotemperaturna adsorpcija azota, model 2000, (ASAP Micrometrics, USA) korišćena je za određivanje teksturalnih svojstava (specifične površine, zapremine pora i prosečnog prečnika pora). Uzorci u prahu (prirodni zeolit-Z, portland cement-CEM I) sušeni su na  $100^{\circ}\text{C}$ .

Raspodela veličine pora i kumulativna zapremina pora određene su metodom živine porozimetrije (Hg Porozimetar Carlo Erba 2000 WS, Italija), s prečnikom u opsegu od 0.002 do  $200\text{ }\mu\text{m}$ . Uzorci pastā (C, CZ10, CZ20, CZ30, stari 28 i 60 dana) sušeni su i degasirani na  $50^{\circ}\text{C}$ . Pri datoj temperaturi ne dolazi do razaranja strukture C-S-H, etringita i drugih produkata hidratacije.

### 2.2.4 Čvrstoća pri pritisku

Za određivanje čvrstoće pri pritisku korišćeno je deset uzoraka pastā po mešavini. Svi uzorci su negovani u skladu sa standardom SRPS EN196-1 [13], izuzev u pogledu uslova u vezi s kvalitetom vode u kojoj su negovani (umesto vode iz česme korišćena je dejonizovana voda).

## 3 REZULTATI I DISKUSIJA

### 3.1 Hemijska analiza

Hemijski sastav PZ prikazan je u tabeli 2. Na stabilnost strukture zeolita utiče više faktora. Jedan od njih je odnos Si/Al koji za korišćeni zeolit iznosi 4.95. Što je prethodno navedeni odnos manji, to je veći stepen izomorfne zamene Si sa Al u tetraedrima kristalne rešetke [14].

Tabela 2. Hemijski sastav prirodnog zeolita [11,14]  
Table 2. Chemical composition of natural zeolite [11, 14]

Hemijski sastav prirodnog zeolita iz Igroša (%) / Chemical composition of natural zeolite from Igros [%]												
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	L.I.*	L.H.**	SO <sub>3</sub>
62.30	12.59	0.23	1.20	4.80	1.94	0.22	0.70	0.63	0.016	11.06	4.59	0.05
* Gubici žarenjem / Loss on ignition												
** Gubici pri zagrevanju / Loss by heating												

Jonoizmenjivački kapacitet PZ prikazan je u tabeli 3. Najveći jonoizmenjivački kapacitet u korišćenom PZ ima katjon kalcijuma.

spectra have been recorded with a spectral resolution of  $4\text{ cm}^{-1}$  in the range of 400 –  $4000\text{ cm}^{-1}$ , with 32 averaged scans per one measurement. The spectra of all investigated samples have been measured using the KBr pellet technique. One of the advantages of using FTIR spectroscopy is a possibility to study vibration properties of both amorphous and crystalline samples [12].

### 2.2.3 Textural characterization

Low temperature nitrogen adsorption, Model 2000, (ASAP Micrometrics, USA) has been used for the determination of textural properties (specific surface area, pore volume and average pore diameter). Powder samples (natural zeolite, ordinary Portland cement-CEM I) have been oven-dried at  $100^{\circ}\text{C}$ .

The pore size distribution and the cumulative volume of pores have been determined by mercury intrusion porosimetry (Hg Porosimeter Carlo Erba 2000 WS, Italia), diameter range of 0.002– $200\text{ }\mu\text{m}$ . Paste samples (C, CZ10, CZ20, CZ30, 28 and 60 days old) were oven-dried and degassed at  $50^{\circ}\text{C}$ . At a given temperature there is no destruction of the structure of C-S-H, ettringite and other products of hydration.

### 2.2.4 Compressive strength

The compressive strength of pastes has been determined on 10 samples per mixture. All the samples have been cured in accordance with standard SRPS EN196-1 [13], except for the condition related to the quality of curing water (deionized water has been used instead of tap water).

## 3 RESULTS AND DISCUSSION

### 3.1 Chemical analyses

Chemical composition of NZ is shown in Table 2. The stability of zeolite structure depends on several factors. One of them is ratio Si/Al and for the used NZ the value of this ratio is 4.95. The smaller the ratio, the greater is the extent of isomorphous substitution of Al for Si in the tetrahedral framework [14].

The ion exchanged capacity of NZ is shown in Table 3. The highest value has had calcium cation.

Tabela 3. Jonoizmenjivački kapacitet i izmenjivi katjoni nakon tretiranja sa  $NH_4^+$  [14]  
Table 3. Cation-exchange capacity and exchanged cations after treatment by  $NH_4^+$  [14]

CEC ( meq/100g)	K	Na	Ca	Mg
180	4.4	7.3	147.5	20.8

### 3.2 Teksturalna karakterizacija komponenti u prahu

Vrednosti specifične mase, specifične površine i zapremine pora date su u tabeli 4. Navedeni rezultati potvrđuju da zeolit ima poroznu strukturu.

### 3.2 Textural characterization of powder components

The results of true density, specific surface area and the volume of pores are presented in Table 4. They confirmed the porous structure of zeolite.

Tabela 4. Specifična masa, BET specifična površina, zapremina pora [14]  
Table 4. True densities, BET surface area, Volumes of pores [14]

	Specifična masa True density ( $kg/m^3$ )	BET specifična površina BET surface area ( $m^2/g$ )	Zapremina pora Volumes of pores ( $cm^3/g$ )
CEM I 42,5	3126	1.5474	0.008483
Natural zeolite	2312	78.1586	0.230315

### 3.3 Mineraloška karakterizacija

#### 3.3.1 XRD analiza

##### 3.3.1.1 Priridni zeolit

Prirodni zeolit sadrži klinoptilolit kao glavni mineral  $(Na,K,Ca)_5Al_6Si_{30}O_{72}18H_2O$  i glinoviti mineral smektit  $(Na,Ca)_{0.33}(Al,Mg)_2(Si_4O_{10})(OH)_2nH_2O$  u manjoj količini [15].

### 3.3 Mineralogical characterization

#### 3.3.1 XRD analyses

##### 3.3.1.1 Natural zeolite

Zeolite tuff contains mineral clinoptilolite  $(Na,K,Ca)_5Al_6Si_{30}O_{72}18H_2O$  as a main and clay mineral smectite  $(Na,Ca)_{0.33}(Al,Mg)_2(Si_4O_{10})(OH)_2nH_2O$  as a minor component, [15].

##### 3.3.1.2 Uzorci pasta

Svi uzorci pasta ispitani su pomoću XRD analize kako bi se identifikovali produkti hidratacije, kao i smanjenje količine minerala klinoptilolita, glavne komponente zeolita, u odnosu na proteklo vreme hidratacije (28 i 60 dana), slike 1 i 2. Napredovanje pucolanske reakcije dovodi se u vezu s formiranjem novih hidratiranih jedinjenja i smanjenjem količine  $Ca(OH)_2$  u pastama. Formirani produkti hidratacije isti su kod uzoraka starih 28 i 60 dana i navedeni su kao: portlandit, etringit, C-S-H i C-A-H faze.

Očekivano je da se s povećanjem udela PZ u pastama postepeno smanjuje intenzitet pikova koji odgovaraju portlanditu ( $Ca(OH)_2$ ). Međutim, ova pretpostavka se ispostavila nevalidnom kada je reč o rezultatima XRD analize uzoraka starosti 28 dana (sl. 1). Tačnije, pikovi koji odgovaraju portlanditu ( $d \sim 4.9, 2.6 \text{ \AA}$ ) u pasti CZ20 starosti 28 dana imaju najveće intenzitete. Najverovatnije je da je ovaj rezultat posledica svojstva PZ poznatog kao sadržaj *extraframework* katjona. Zamena datih katjona katjonima koji potiču iz rastvora koji ispunjava pore paste može da dovede ili do povećanja ili do smanjenja koncentracije alkalija u pornom rastvoru. Do čega će doći, zavisi od jonoizmenjivačkog kapaciteta PZ. U ovom slučaju, prihvatljivo objašnjenje je da je nakon cepanja strukture PZ i njegovog ulaska u pucolansku reakciju došlo do otpuštanja *extraframework* katjona u porni rastvor. Kao

##### 3.3.1.2 Paste samples

All paste samples have been examined by the means of XRD in order to identify hydration products as well as the degradation of mineral clinoptilolite, zeolite main component, in relation to the age of hydration (28 and 60 days), Figs. 1, 2. The progress of pozzolanic reactions has been coupled with the formation of new hydrated compounds and reduction of the amount of  $Ca(OH)_2$  in the paste. The formed hydration products are the same for both 28-day and 60-day old samples and they are specified as: portlandite, ettringite, C-S-H and C-A-H phases.

The reduction of the peak intensity related to portlandite ( $Ca(OH)_2$ ) has been expected to gradually decrease as the amount of zeolite has increased. This statement is not valid for the results of XRD analysis of samples aged 28 days, Fig 1. Exactly, the greatest intensities have the peaks of portlandite ( $d \sim 4.9, 2.6 \text{ \AA}$ ) for paste CZ20 28 days old. Most probably this result is a consequence of the zeolite property known as *extraframework* cation content. The exchange of the zeolite *extraframework* cations with the cations present in the pore solution can either increase or lower the alkali concentration in the pore solution. This depends on zeolite ion exchange capacity. In this case, a reasonable explanation is that after zeolite structure has been partly broken down and taken part in pozzolanic reaction, the *extraframework* cations have been released

posledica navedenog javila se povećana koncentracija alkalija i zbog jonskog efekta zaustavlja se rastvaranje  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . To je moglo da utiče na strukturu C-S-H, što je i potvrđeno FTIR analizom – polimerizacija  $\text{SiO}_4^{4-}$  grupa manje je zastupljena u formiranoj C-S-H fazi (sl. 3).

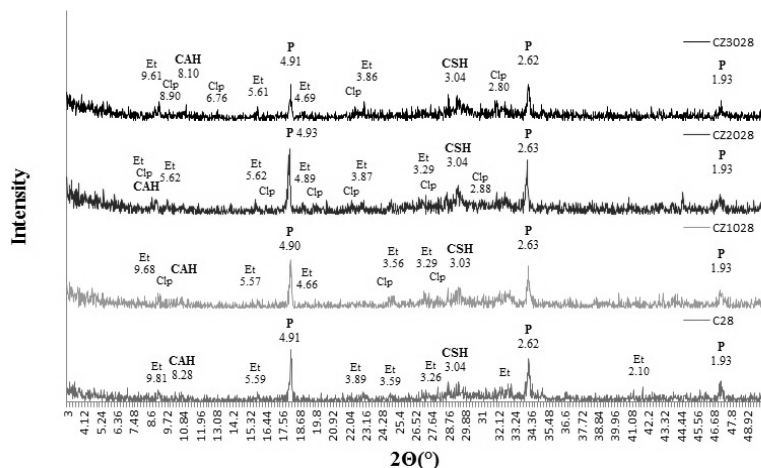
Kao što se može uočiti sa slika 1 i 2, pikovi koji odgovaraju klinoptilolitu, glavnoj komponenti PZ, nisu nestali tokom procesa hidratacije, što implicira da proces razgradnje PZ nije završen ni nakon 60 dana.

Ni kod uzoraka starih 60 dana nije zabeleženo značajno smanjenje intenziteta pikova koji odgovaraju portlanditu pri porastu udela zeolita u pastama (sl. 2).

into the pore solution. Consequently, alkali concentrations have increased and, due to ionic effect, they have suppressed  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  dissolution. This also might have influenced the structure of C-S-H, which has been confirmed by FTIR analysis (polymerization of the  $\text{SiO}_4^{4-}$  units is less pronounced in formed C-S-H phase), Figs. 3, 5a.

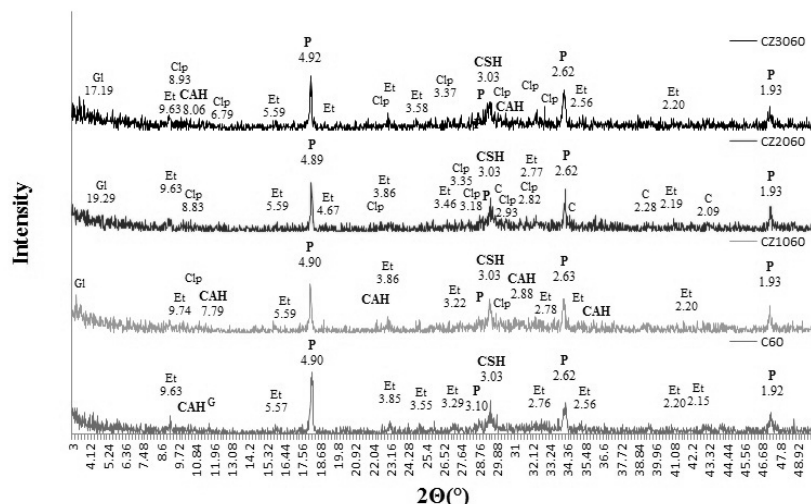
As seen from Figures 1 and 2 the peaks corresponding to clinoptilolite, the main component of zeolite, have not disappeared during the hydration process. It clearly implies that the process of zeolite degradation is still unfinished even after 60 days.

The intensities of portlandite peaks for samples at the age of 60 days also failed to present a remarkable decrease with the enhancement of the zeolite content, Fig 2.



Slika 1. XRD paterni očvrsljih cementnih pastā i cementnih pastā koje sadrže PZ kao DCM, nakon 28 dana hidratacije (P-portlandit, Et-etringit, C-S-H-kalcijumsilikatni hidrati, C-A-H-kalcijumaluminatni hidrati, Clp- klinoptilolit) [11, 14]

Figure 1. XRD patterns of the hardened cement paste and cement pastes containing NZ as SCM, after 28 days of hydration (P-portlandite, Et-ettringite, C-S-H-calcium silicate hydrate, C-A-H-calcium aluminium hydrate, Clp-clinoptilolite) [11, 14]



Slika 2. XRD paterni očvrsljih cementnih pastā i cementnih pastā koje sadrže PZ kao DCM, nakon 60 dana hidratacije (P-portlandit, Et-etringit, C-S-H-kalcijumsilikatni hidrati, C-A-H-kalcijumaluminatni hidrati, Clp- klinoptilolit, G-gips, C-calcit)

Figure 2. XRD patterns of the hardened cement paste and cement pastes containing NZ as SCM, after 60 days of hydration (P-portlandite, Et-ettringite, C-S-H-calcium silicate hydrate, C-A-H-calcium aluminium hydrate, Clp-clinoptilolite, G-gypsum, C-calcite)

Formiranje kalcijum-siliko-hidrata (C-S-H) evidentirano je kod uzoraka obe starosti i pripisuje se postojanju postepenog povećanja pozadinskog zračenja u opsegu 20: 25-35° (sl. 1, 2).

### 3.3.2 FTIR analiza

Glavni cilj primene FTIR spektroskopije bio je analiza produkata hidratacije pripremljenih pastā nakon 28 i 60 dana hidratacije. Uporedni prikaz dobijenih FTIR spektara dat je na slikama 3 i 4.

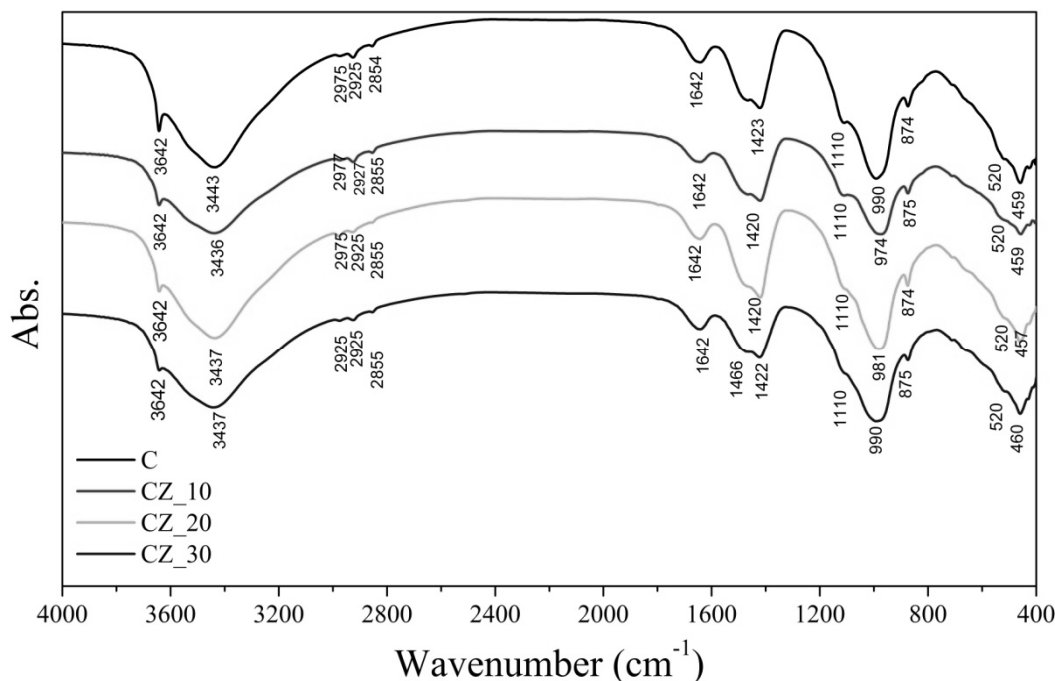
Na osnovu dobijenih FTIR spektara prikazanih na slikama 3 i 4, može se uočiti pojava apsorpcionih traka na ~3640  $\text{cm}^{-1}$ , ~3435  $\text{cm}^{-1}$  i ~1646  $\text{cm}^{-1}$ , koje se pripisuju postojanju vibracija različitih oblika O-H molekulske grupe. Naime, apsorpcione trake na ~3640  $\text{cm}^{-1}$  upućuju na prisustvo valentnih vibracija Ca-OH iz portlandita, dok se apsorpcione trake na ~3435  $\text{cm}^{-1}$  i ~1646  $\text{cm}^{-1}$  dovode u vezu s prisustvom vodonične veze OH grupe u molekulima  $\text{H}_2\text{O}$  koji su adsorbovani na površini ispitanih uzoraka. Pojava apsorpcionih traka na ~1421  $\text{cm}^{-1}$ , ~876  $\text{cm}^{-1}$  i ~711  $\text{cm}^{-1}$  dovodi se u vezu s prisustvom karbonata u strukturi ispitanih uzoraka [12]. Postojanje apsorpcione trake na ~1111  $\text{cm}^{-1}$  može se pripisati prisustvu  $\text{SO}_4^{2-}$  molekulske vibracije koja može da ukaže na postojanje faze etringita ili gipsa. Postojanje apsorpcione OH trake na ~3435  $\text{cm}^{-1}$  koja se prepisuje vodoničnoj vezi OH grupe i dovodi se u vezu s prisustvom vode u strukturi etringita, dodatno potvrđuje činjenicu da je etringit prisutan.

The formation of calcium silicate hydrate (C-S-H) has been evident for the samples at both ages and is attributed to the existence of the gradual increase of background in the range 20: 25-35°, Figs.1, 2.

### 3.3.2 FTIR analyses

The main objective of the FTIR study has been to analyze the hydration products of the prepared pastes after 28 and 60 days of hydration. The comparison of the obtained FTIR spectra of the pastes is presented in Figs 3 and 4.

According to the obtained FTIR spectra presented in Figures 3 and 4, the appearance of the absorption bands at ~3640  $\text{cm}^{-1}$ , ~3435  $\text{cm}^{-1}$  and ~1646  $\text{cm}^{-1}$  has been noted. These bands are ascribed to the existence of the vibration of different modes of O-H molecular group. Namely, the absorption bands at ~3640  $\text{cm}^{-1}$  indicate the presence of stretching vibrations of Ca-OH from portlandite, while the absorption bands at ~3435  $\text{cm}^{-1}$  and ~1646  $\text{cm}^{-1}$  are associated with the presence of hydrogen bonded OH group in molecules of  $\text{H}_2\text{O}$  which are adsorbed on the surfaces of the tested samples. The occurrence of the absorption bands at ~1421  $\text{cm}^{-1}$ , ~876  $\text{cm}^{-1}$  and ~711  $\text{cm}^{-1}$  is associated with the presence of the carbonates in the structure of the tested samples [12]. The presence of the absorption band at the ~1111  $\text{cm}^{-1}$  could be attributed to the presence of the  $\text{SO}_4^{2-}$  molecular vibration which could be assigned to the presence of the ettringite mineral phase or gypsum. The existence of the OH absorption band at ~3435  $\text{cm}^{-1}$  is attributed to hydrogen bonded OH group and could be related to the water present in ettringite structure which additionally supports the fact that ettringite is present.



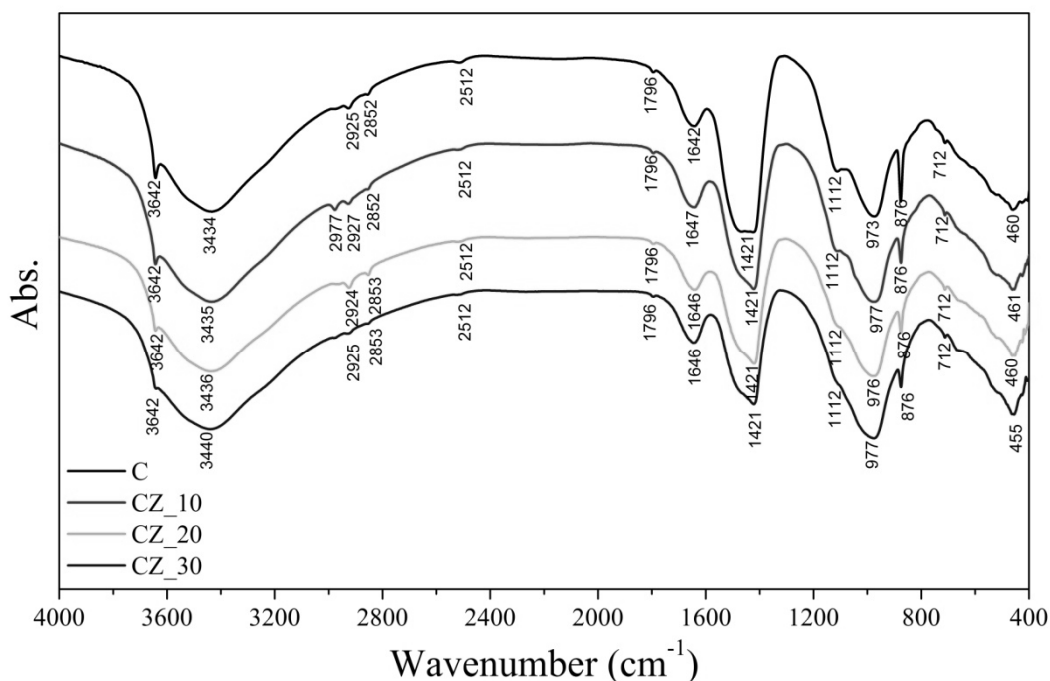
Slika 3. FTIR spektri pastā nakon 28 dana hidratacije  
Figure 3. FTIR spectrum of pastes after 28 days of hydration

Prisustvo produkata hidratacije kao što su kalcijum-silikohidrati (C-S-H) može da se poveže sa apsorpcionom trakom na  $\sim 970 \text{ cm}^{-1}$  zbog postojanja Si-O valentine vibracije  $Q^2$  tetraedara  $\text{SiO}_2$ . Dodatno, apsorpcione trake na  $\sim 660\text{-}670 \text{ cm}^{-1}$  i na  $450\text{-}500 \text{ cm}^{-1}$ , u kojima je utvrđeno prisustvo Si-O-Si savijajuće vibracije i deformacionih vibracija  $\text{SiO}_4$  tetraedra, prema navedenom redosledu, mogu se takođe prepisati prisustvu C-S-H faze [16].

Upoređujući FTIR spektre referentnog uzorka (cementna pasta bez zeolita) i pastā koje sadrže različitu količinu zeolita u oba slučaja (nakon 28 i 60 dana hidratacije), primećene su značajne promene u dobijenim FTIR spektrima, što bi moglo da ukaže na izvesne izmene u strukturi. Naime, primetno se smanjio intenzitet apsorpcionih traka koje upućuju na prisustvo  $\text{Ca(OH)}_2$ ,  $\text{CaCO}_3$  i  $\text{SO}_4^{2-}$  s porastom udela zeolita (sl. 3, 4), nakon 28 i 60 dana hidratacije. Dodatno, postoji razlika u vezi s pomeranjem apsorpcione trake na  $\sim 970 \text{ cm}^{-1}$  koja se odnosi na postojanje Si-O valentnih vibracija  $Q^2$  tetraedra u C-S-H (sl. 3, 5).

The presence of the hydration products such as calcium silicate hydrates (C-S-H) could be related to occurrence of absorption bands at  $\sim 970 \text{ cm}^{-1}$  due to the existence of the Si-O stretching vibrations of  $Q^2$  tetrahedra of the  $\text{SiO}_2$ . Additionally, the absorption bands at  $\sim 660\text{-}670 \text{ cm}^{-1}$  and at  $\sim 450\text{-}500 \text{ cm}^{-1}$ , which are designated to the presence of Si-O-Si bending vibration and deformation of  $\text{SiO}_4$  tetrahedra vibrations, respectively, could be ascribed to the presence of the C-S-H, as well [16].

Comparing the FTIR spectra of the reference sample (cement pastes without zeolite) and pastes with different amount of zeolite in both cases (after 28 and 60 days of hydration), certain changes of the obtained FTIR spectra have been noticed, which could indicate the existence of certain alteration of the structure. Namely, there has been a notable gradual decrease of absorption bands intensities related to the presence of  $\text{Ca(OH)}_2$ ,  $\text{CaCO}_3$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  with the increase of the wt% of zeolite in the structure, Figs. 3, 4, both after 28 and 60 days of hydration. Moreover, there is a difference regarding the shift of the absorption band at  $\sim 970 \text{ cm}^{-1}$  related to the existence of Si-O stretching vibrations of  $Q^2$  tetrahedra of the C-S-H, Figs. 3 and 5.



Slika 4. FTIR spektri pastā nakon 60 dana hidratacije  
Figure 4. FTIR spectra of pastes after 60 days of hydration

Na primer, u slučaju pastā nakon 28 dana hidratacije može se uočiti pomeranje ka nižim vrednostima talasnih brojeva kod pastā CZ10 i CZ20 ( $974.05 \text{ cm}^{-1}$ ,  $981.09 \text{ cm}^{-1}$ , prema navedenom redosledu) u poređenju s referentnom cementnom pastom C ( $990.05 \text{ cm}^{-1}$ ), što se može pripisati smanjenju stepena polimerizacije C-S-H strukture (sl. 3). S druge strane, na osnovu poređenja talasnih brojeva uzoraka CZ10, CZ20 i CZ30 opaža se pomeranje ka većim talasnim brojevima ( $974.05 \text{ cm}^{-1}$ ,  $981.09 \text{ cm}^{-1}$ ,  $990.05 \text{ cm}^{-1}$ , prema navedenom redosledu)

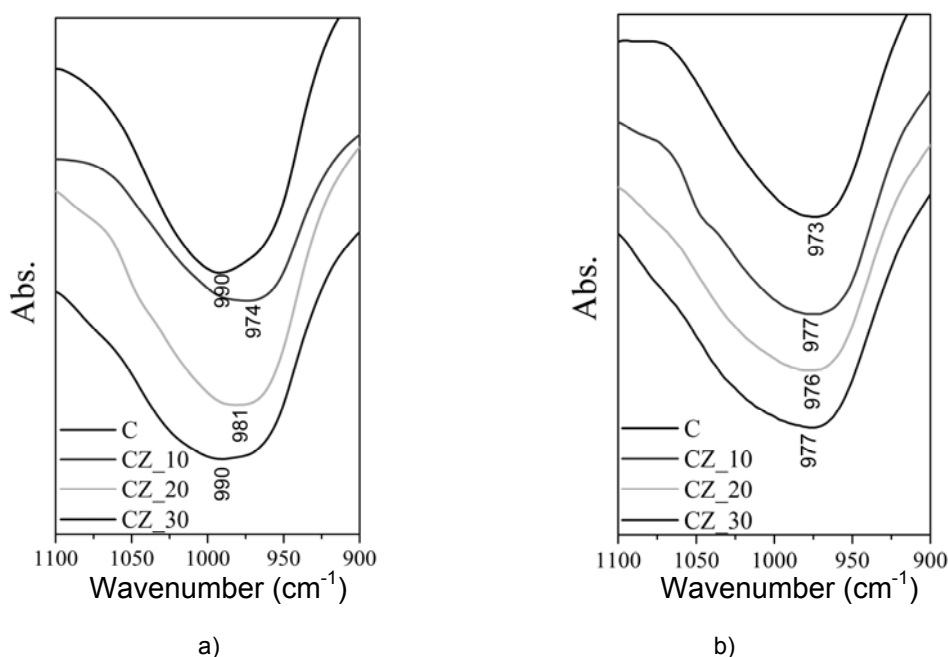
For example, in the case of the pastes after 28 days of hydration the shift toward the lower wavenumber values for CZ10 and CZ20 pastes ( $974.05 \text{ cm}^{-1}$ ,  $981.09 \text{ cm}^{-1}$ , respectively) has been noted in comparison with the reference cement paste, sample C ( $990.05 \text{ cm}^{-1}$ ), which could be attributed to the decrease of polymerization level of the C-S-H structure, Fig. 3. On the other hand, the comparison of the wavenumbers among the samples CZ10, CZ20 and CZ30 has been perceived the shift toward the higher wavenumber

što upućuje na povećani nivo polimerizacije. Najveće pomeranje pozicije pomenute Si-O valentine trake bilo je kod uzorka CZ10 (sl. 5a), sugerišući da razlaganje zeolita utiče na sastav C-S-H faze tokom procesa hidratacije.

Drugim rečima, povećanje količine zeolita utiče na hemijski sastav pornog rastvora, generalno na porast sadržaja alkalija, Si i Al, i istovremeno na opadanje koncentracije Ca. Na koncentraciju alkalija u kontaktnoj tečnosti utiču sadržaj *extraframework* katjona u zeolitu kao i njegove jonoizmenjivačke karakteristike. Usled jonskog efekta povećanje sadržaja alkalija smanjuje se sadržaj Ca, dok se koncentracije Si i Al generalno povećavaju u toku vremena. U skladu s tim, smanjenje Ca/Si odnosa dovodi do produženja silikatnog lanca (povećava se stepen polimerizacije). To bi moglo da bude prihvatljivo objašnjenje dobijenih rezultata (sl. 3, 5).

values ( $974.05\text{ cm}^{-1}$ ,  $981.09\text{ cm}^{-1}$ ,  $990.05\text{ cm}^{-1}$ , respectively) indicating the increase of polymerization level. The largest shift of the mentioned Si-O stretching band position has been found in the case of CZ10, Fig. 5a, suggesting that zeolite decomposition has influenced the composition of C-S-H phase during the hydration process.

This points out that the increase of zeolite amount thoroughly influences pore solution chemistry, generally increasing alkali, Si and Al contents and at the same time decreasing Ca concentrations in the pore solution. The alkali concentration in the contact fluid has been affected by the extra-framework cation content and cation exchange characteristics of zeolite. Due to the ion effect the increasing alkali content decreases Ca content while concentrations of Si and Al generally increase through time. Accordingly, the decrease of Ca/Si ratio leads to lengthening of silicate chains (increase of polymerization). That could be a reasonable explanation for the obtained results, Figs 3-5.



Slika 5. FTIR spektri apsorpcione trake na  $\sim 970\text{ cm}^{-1}$  kod pastā nakon a) 28 i b) 60 dana hidratacije  
Figure 5. FTIR spectra of the absorption band at  $\sim 970\text{ cm}^{-1}$  of pastes after a) 28 and b) 60 days of hydration

Nakon 60 dana hidratacije, drugačija je situacija u pogledu položaja apsorpcione trake koja se odnosi na postojanje Si-O valentnih vibracija  $Q^2$  tetraedara. Naime, došlo je do mnogo manjeg pomeranja apsorpcione trake prema većim talasnim brojevima u odnosu na referentni uzorak, sl. 5b. Ova činjenica upućuje na veći stepen polimerizacije C-S-H strukture sa dodatkom zeolita, sl. 4, 5b, u poređenju s referentnim uzorkom nakon 60 dana hidratacije.

Na osnovu rezultata FTIR analize može se bez ikakve sumnje zaključiti da uvođenje zeolitne faze utiče na sastav i strukturu C-S-H faze tokom procesa hidratacije.

After 60 days of hydration, there is a different situation regarding the position of the absorption band related to the existence of the Si-O stretching vibrations of  $Q^2$  tetrahedra. Namely, there has been a much smaller shifting of the absorption band towards the higher wavenumber values in comparison with the reference sample, Fig. 5b. This indicates a better polymerization of the C-S-H structure with addition of zeolite, Figs. 4, 5b, in comparison with the reference sample after 60 days of hydration.

According to the performed FTIR analysis it can be undoubtedly concluded that introduction of the zeolite phase has influenced the composition and structure of the CSH phase during hydration process.



### 3.3.3 Teksturalna karakterizacija pastā

U okviru ovog istraživanja, živina porozimetrija (ŽP) korišćena je za karakterizaciju strukture pora. Određivanje strukture pora je od izuzetnog značaja za razumevanje hemijskih, fizičkih i mehaničkih svojstava. Analiza koja je ovde data polazi od klasifikacije koja je data prema IUPAC-u (mikropore < 2 nm, mezopore između 2-50 nm, makropore > 50 nm). Ako se uzme u obzir da uz pomoć ŽP metode nije moguće meriti količinu pora sa  $d < 2$  nm, onda je razumljivo da se rezultati u ovom radu odnose samo na mezoporoznost i makroporoznost. U okviru ovog istraživanja očekivalo se da kapilarna poroznost (IUPAC nomenklatura, 10 nm-10  $\mu$ m) zavisi samo od količine produkata hidratacije, naročito C-S-H faze koja se pri formiranju taloži u porama pošto njegovo formiranje vodi ka smanjenju prečnika pora i smanjenju kapilarne poroznosti.

Kapilarne pore s prečnikom u opsegu od 10 nm do 50 nm (mezopore) utiču na skupljanje usled sušenja i tečenja, dok makropore s prečnikom većim od 50 nm, utiču na čvrstoću i na smanjenje propustljivosti pastā, maltera i betona [17].

Opšte je prihvaćeno stanovište da dodavanje DCM dovodi do povećanja ukupne poroznosti, ali i smanjenja prosečnog prečnika pora.

### 3.3.3 Textural characterization of pastes

Mercury intrusion porosimetry (MIP) has been used to characterize pore structure. In general, determination of the pore structure has become important in understanding chemical, physical and mechanical properties. The following analysis has been based on a general classification of the pores that has been given by the IUPAC (micropore- up to 2 nm, mesopore 2-50 nm, macropore > 50 nm). If one takes into account that MIP method is inappropriate to measure the pores with  $d < 2$  nm, then it is logical that the results of the study relate only to meso- and macroporosity. In this study, it has been expected that capillary porosity (IUPAC nomenclature, 10 nm-10  $\mu$ m) is dependent only on the amount of hydrated products, particularly due to the precipitation of C-S-H phase since its formation leads to the reduction of the pore diameter and capillary porosity.

The capillary pores with diameters in the range from 10 nm to 50 nm (mesopores) influence drying shrinkage and creep, while macropores, with diameters greater than 50 nm, influence the strength and impermeable characteristics of paste, mortar and concrete [17].

It is commonly observed that the addition of SCMs results in an increase of total porosity as well as a decrease in mean pore size.

Tabela 5. Rezultati teksturalne analize  
Table 5. The results of textural analysis

Uzorak Sample	Ukupna poroznost Total porosity (%)	Srednji polupreč.pora Average pore radius ( $\mu$ m)	Udeo makropora Macroporosity (%)	Udeo mezopora Mesoporosity (%)
28 dana stari uzorci				
C	<b>17.22</b>	0.50	3.88	13.34
CZ10	<b>30.13</b>	5.30	2.02	28.11
CZ20	<b>26.67</b>	3.80	2.71	23.89
CZ30	<b>31.45</b>	3.80	3.17	28.28
60 dana stari uzorci				
C	<b>26.43</b>	3.80	3.12	23.31
CZ10	<b>21.04</b>	3.80	3.15	17.89
CZ20	<b>2.87</b>	237	2.71	0.16
CZ30	<b>9.98</b>	0.90	1.35	8.63

U tabeli 5 prikazane su vrednosti ukupne poroznosti, srednjeg prečnika pora, makroporoznost i mezoporoznost. Količine makropora izračunate su u odnosu na vrednost ukupne poroznosti i izražene u procentima.

U okviru ovog istraživanja, uticaj zeolita kao DCM u uzorcima starosti 28 dana u skladu je s pomenutim trendom samo u pogledu ukupne poroznosti (tabela 5). Kod pastā starosti 28 dana, koje sadrže zeolit, došlo je do povećanja umesto očekivanog smanjenja prosečnog prečnika pora kao i do smanjenja udela makropora u odnosu na referentnu pastu. S porastom količine zeolita raste i makroporoznost (poređenje između uzoraka CZ10, CZ20 i CZ30). Ustanovljeno je da su pore prečnika do 0.06  $\mu$ m dominantne u cementnim pastama sa zeolitom, dok su u referentnoj pasti naročito izražene pore do 0.03  $\mu$ m (sl. 6).

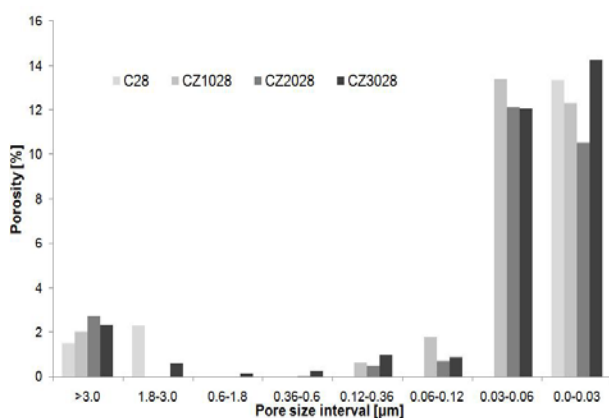
Uzorci pastā starosti 60 dana, koji sadrže cement i zeolit, imaju manju ukupnu poroznost u odnosu na referentnu pastu, tab. 5. Kod uzoraka C, CZ10 i CZ30

In Table 5, the results of total porosity, average pore radius, macro- and mesoporosity are presented. The quantities of macropores were calculated in relation to the total porosity and are expressed in percentages.

In this study, the influence of zeolite as a SCM for the samples 28 days old is in accordance with the mentioned course just regarding total porosity, Table 5. For the pastes with zeolite, 28 days old, opposite to the expected decrease in the average diameter, there has been an increase in relation to reference paste. Macroporosity has been increased when the amount of zeolite has been increased (comparison among samples CZ10, CZ20 and CZ30). Dominant pore diameter interval has been in the range, up to 0.06  $\mu$ m for cement pastes with zeolite, while it has been particularly prevailing with pores up to 0.03  $\mu$ m for reference paste, Fig. 6.

The pastes made of cement with zeolite, 60 days old, have had lower values of total porosity than referent paste, Table 5. For samples C, CZ10, and CZ30 the

preovlađuju pore do 0.03  $\mu\text{m}$ , sl. 7. Vrednosti dobijene za uzorak CZ20 potpuno su drugačije nego kod ostalih uzoraka. Ukupna poroznost je veoma mala (2.87%), prosečni poluprečnik pora ekstremno velik (237  $\mu\text{m}$ ) kao i udeo makropora ( $2.71/2.87=94.42\%$ ). Za ovako neuobičajene rezultate potrebno je dodatno pojašnjenje. Preciznije, za posmatrani uzorak teško je prihvatiti ovako nisku vrednost ukupne poroznosti, naročito ako uzmemo u obzir dobijenu vrednost čvrstoće pri pritisku (tab. 6). U ovom slučaju, izgleda da nisu sve pore registrovane metodom ŽP, kao što se dešava u slučaju prisustva pora s gustim površinskim slojem (eng. *hollow-shell* pore) [18]. Obično se *hollow-shell* pore formiraju tokom procesa hidratacije u unutrašnjosti zrna klinkera, dok se na površini formira C-S-H produkt hidratacije. Vrlo često ih zovu Hadlijeva zrna (eng. *Hadley grains*), a veličine su između 1 i 15  $\mu\text{m}$ . Osim toga, smeštena su u deo sa gelskom strukturom te proizlazi da su povezana s mrežom kapilarnih pora preko manjih gelskih pora. Zbog *ink-bottle* efekta koji se pritom javlja, nije ih moguće registrovati pomoću ŽP metode. Slična situacija može se desiti kada su u pitanju zrna izreagovanog zeolita. Naime, *ink-bottle* efekat može se pojaviti kao rezultat formiranja C-S-H faze na površini zeolita, dok je unutrašnjost zrna zeolita šuplja. Ako je struktura formiranih produkata hidratacije bila previše gusta, onda je pore u unutrašnjosti zrna teško registrovati.



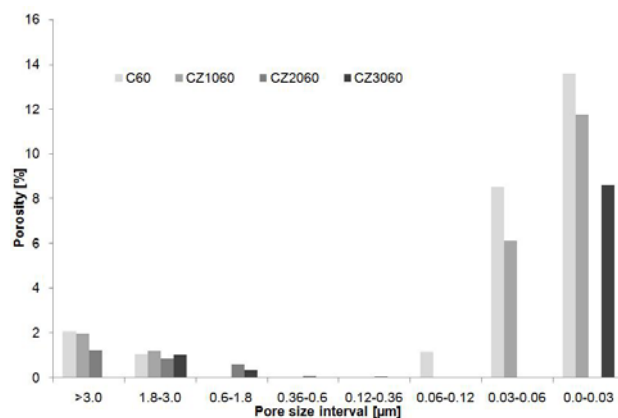
Slika 6. Raspodela veličine pora za paste starosti 28 dana  
Figure 6. Pore size distribution for the pastes 28 days old

Generalno, uzorci pastā CZ20 i CZ30 pri starosti od 60 dana imaju značajno manju poroznost u poređenju sa uzorcima C i CZ10, kao i u poređenju sa svim uzorcima starim 28 dana (tab. 5). Na osnovu rezultata ŽP za uzorke ispitane nakon 28 dana hidratacije, može se zaključiti da su mezopore dominantne. Kod uzoraka C, CZ10 i CZ30 koji su ispitani nakon 60 dana hidratacije, može se zaključiti da preovlađuju mezopore dok su kod paste CZ20 makropore dominantne.

### 3.4 Čvrstoća pri pritisku

Smatra se da su čvrstoće cementnih pastā određene brzinom hidratacije cementa, dok se u cementno-zeolitnim pastama uticaj zeolita ogleda kroz efekat razređivanja (smanjena količina cementa u odnosu na

dominant pore interval has been up to 0.03  $\mu\text{m}$ , Fig 7. The values obtained for sample CZ20 have been completely different from the others. In this case the total porosity has been very low (2.87%), average pore radius extremely high (237  $\mu\text{m}$ ) and the ratio of macropores extremely high ( $2.71/2.87=94.42\%$ ). These uncommon results need further clarification. To be precise, for this sample it has been difficult to accept that the total porosity is so low, especially if we take into account the obtained values for compressive strength, Table 6. It seems that in this case some pores are not registered by MIP, like hollow-shell pores [18]. Usually, hollow-shell pores are formed during hydration process within the clinker grains, while hydrated product (C-S-H) is usually formed on the surface. They are often called Hadley grains and are in the size range from 1 to 15  $\mu\text{m}$ . Furthermore, they are embedded in cement gel resulting that they are connected to the continuous capillary pore system through smaller gel pores. Because of their "ink-bottle" effect, they may not easily be detected by MIP. A similar situation may appear when reacted zeolite grains have been in question. Namely, the "ink-bottle" effect may be the result of formation of C-S-H phase on the surface of zeolite, while the inside of zeolite grain is hollow. If the structure of the formed hydrated products is too dense, pores in the interior of the grain can be difficult to detect.



Slika 7. Raspodela veličine pora za paste starosti 60 dana  
Figure 7. Pore size distribution for the pastes 60 days old

Generally, samples CZ20 and CZ30 at age of 60 days have a significantly lower porosity compared to C and CZ10 samples as well as in comparison to all the samples at age of 28 days, Table 5. According to the obtained MIP results for the samples tested after 28 days of hydration, it was concluded that mesopores have been dominant. In samples C, CZ10 and CZ30 which were tested after 60 days of hydration, mesopores have been prevailing, while macropores has been dominant for CZ20 sample.

### 3.4 Compressive strength

The strength development in cement pastes is conceived to be determined by the hydration rate of cement, while in cement-zeolite pastes the influence of zeolite inclusion is determined by dilution effect (cement

paste sa čistim cementom), efekat pakovanja, ubrzanje procesa hidratacije i pucolansku reakciju. Uobičajeno je shvatanje da prva tri parametra najviše utiču na razvoj čvrstoće do 28 dana, a poslednji na čvrstoću nakon 28 dana. Prema literaturnim podacima [17] čvrstoće dobijene na pastama moguće je dovesti u vezu s makroporoznošću uzoraka. Ova korelacija zasnovana je na činjenici da su pore veće od 50 nm, koje se smatraju makroporama, najverovatnije veoma značajne za svojstva čvrstoće i nepropustljivosti [17]. Zato su u ovom radu predstavljeni, analizirani i poređeni rezultati čvrstoće pri pritisku i makroporoznosti.

Na slici 8. i u tabeli 6. prikazane su srednje vrednosti čvrstoće pri pritisku ( $f_{cm,28}$ ,  $f_{cm,60}$ ) određene na 10 uzoraka za svaku pastu, starosti 28 i 60 dana. Zbog rasipanja rezultata određene su i standardne devijacije ( $\sigma_{28}$ ,  $\sigma_{60}$ ), tabela 6.

Tabela 6. Čvrstoća pri pritisku ( $f_{cm,28}$ ,  $f_{cm,60}$ ) pastā C, CZ10, CZ20 i CZ30 nakon 28 i 60 dana, i njihove standardne devijacije ( $\sigma_{28}$ ,  $\sigma_{60}$ )

Table 6. 28-day and 60-day compressive strengths ( $f_{cm,28}$ ,  $f_{cm,60}$ ) of C, CZ10, CZ20 and CZ30 pastes and their standard deviations ( $\sigma_{28}$ ,  $\sigma_{60}$ )

Vrsta paste / Paste type	C	CZ10	CZ20	CZ30
$f_{cm,28}$ [MPa]	34.821	37.783	39.137	30.411
$\sigma_{28}$ [MPa]	± 5.211	± 7.288	± 5.523	± 6.832
$f_{cm,60}$ [MPa]	39.946	39.500	37.445	34.207
$\sigma_{60}$ [MPa]	± 7.170	± 5.160	± 7.348	± 6.357

Čvrstoće pri pritisku takođe su iskazane u odnosu na čvrstoće pri pritisku referentne paste starosti 28 dana i date su u procentima (tab.7).

The compressive strength values have also been expressed as relative percentages of the 28-day compressive strength of the reference paste, Tab. 7.

Tabela 7. Čvrstoće pri pritisku ispitanih pastā ( $\Delta f_{cm,28}$ ,  $\Delta f_{cm,60}$ ) u poređenju sa čvrstoćom pri pritisku referentne paste starosti 28 dana (%)

Table 7. Compressive strength of tested pastes ( $\Delta f_{cm,28}$ ,  $\Delta f_{cm,60}$ ) compared to the 28-day strength of reference mortar [%]

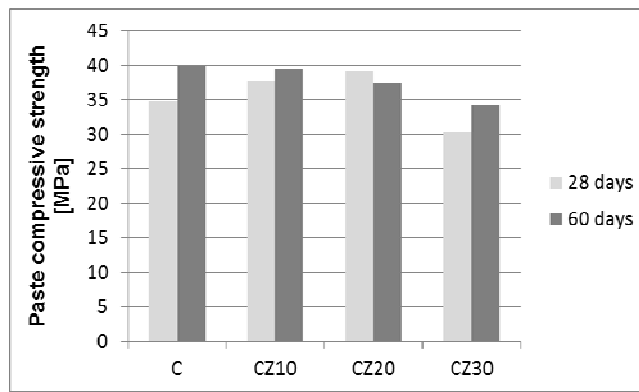
Vrsta paste / Paste type	C	CZ10	CZ20	CZ30
$\Delta f_{cm,28}$ [%]	<b>100.00</b>	108.51	112.40	87.34
$\Delta f_{cm,60}$ [%]	114.718	113.437	107.536	98.237

Nakon 28 dana nege, paste CZ10 i CZ20 imale su za 8.51% i 12.40%, veću čvrstoću pri pritisku, prema navedenom redosledu, u odnosu na referentnu pastu. Međutim, nakon 60 dana, primetan je blagi pad (tab. 7, sl. 8).

S porastom udela zeolita, smanjuje se čvrstoća pri pritisku pastā, CZ20 i CZ30, starosti 60 dana, u odnosu na čvrstoću referentne paste. Suprotno pomenutim pastama, uzorak CZ10 jedini je skoro dostigao vrednost čvrstoće pri pritisku referentne paste.

After 28 days of curing the results of compressive strength values have shown that pastes CZ10 and CZ20 by 8.5% and 12.40%, respectively, have had higher compressive strength than the reference sample. However, after 60 days a slight decline is shown, Tab. 7, Fig 8.

With an increase of zeolite content, the compressive strength of paste samples CZ20 and CZ30 at the age of 60 days has been reduced compared to the strength of the reference paste. In contrast, the sample CZ 10 has been the only one which has almost reached the compressive strength value of the reference sample.



Slika 8. Čvrstoće pri pritisku pastā C, CZ10, CZ20 i CZ30 starosti 28 i 60 dana  
Figure 8. 28-day and 60-day compressive strengths of C, CZ10, CZ20 and CZ30 pastes

S ciljem utvrđivanja u kojoj meri je makroporoznost uticala na vrednosti čvrstoća, analiziran je redosled po kom se smanjuju vrednosti čvrstoća s redosledom po kom se povećava količina makropora za uzorke starosti 28 i 60 dana (tab. 5, 7). Dobijeni rezultati su prikazani u tabeli 8.

In order to determine how the amount of macropores has influenced the compressive strength values, the order of compressive strength decrease has been analysed in comparison with the order of macroporosity values increase for the samples 28 and 60 days old, Tabs. 5, 7. The obtained results are presented in Table 8.

Tabela 8. Korelacija između čvrstoće pri pritisku i makroporoznosti  
Table 8. Correlation between compressive strength and macroporosity

	28 dana stari uzorci 28 days old samples	60 dana stari uzorci 60 days old samples
Pravac smanjenja čvrstoće pri pritisku The order of decrease of comp. strength values	CZ20→CZ10→C→CZ30	C(CZ10)→CZ20→CZ30
Pravac povećanja vrednosti makroporoznosti The order of increase of macroporosity values	CZ10→CZ20→CZ30→C	CZ30→CZ20→C(CZ10)

Analiza rezultata prikazanih u tabeli 8 pokazuje da postoji izvestan stepen korelacije za uzorke starosti 60 dana. Naime, uzorak CZ20 ima središnji položaj u oba analizirana niza, dok uzorci C i CZ10 imaju slične vrednosti čvrstoće pri pritisku i makroporoznosti. Zato imaju isti položaj u oba analizirana niza (tabela 8).

The analysis of the results presented in Table 8 has shown that there is a certain degree of correlation for 60 days aged samples. Namely, sample CZ20 has had a medial position in both analysed sequences, while samples C and CZ10 have similar values of compressive strength as well as microporosity. Therefore, they have taken the same position in both analysed sequences, Tab. 8.

#### 4 ZAKLJUČCI

Na osnovu rezultata ovog rada mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Prirodni zeolit, iz Igroša, Srbija, najvećim delom sastoji se od minerala klinoptilolita. Odnos Si/Al je 4.95. Specifična površina je 78.1586 m<sup>2</sup>/g.
- Rendgenostruktorna analiza potvrdila je prisustvo minerala portlandita, etringita, C-S-H, C-A-H. Osim toga, u pastama s prirodnim zeolitom indentifikovan je klinoptilolit za uzorke obe starosti. Semikvantitativna analiza intenziteta pikova portlandita, za uzorke pastā starih 28 dana, ukazuje na nedostatak korelacije između pravca u kom opada intenzitet pikova portlandita i pravca u kom raste sadržaj zeolita. Sličan odnos je

#### 4 CONCLUSION

The following conclusions can be drawn from the results of this study:

- The main mineral of natural zeolite from Igroš, Serbia, is clinoptilolite. Ratio Si/Al is 4.95. Specific surface area is 78.1586 m<sup>2</sup>/g.
- XRD analysis of the pastes has confirmed the presence of minerals portlandite, ettringite, C-S-H, C-A-H. Additionally, clinoptilolite has been indentified in pastes with zeolite, for both ages. Semiquantitative analysis of portlandite peak intensities, for paste samples 28 days old, has indicated the absence of correlation between the sequence of decrease of portlandite peak intensities and the sequence of

dobijen za uzorke starosti 60 dana. Postojanje *extraframework* katjona kao i jonsko-izmenjivačka sposobnost smatraju se odgovornim za sprečavanje rastvaranja portlandita.

- Na osnovu FTIR analize može se zaključiti da je dodavanje zeolita u cementnu pastu uticalo na sastav i strukturu C-S-H faze u toku procesa hidratacije. Kod pastā koje su sadržale zeolit zabeleženo je pomeranje vrednosti talasnih brojeva za paste CZ10, CZ20 ( $974.05\text{ cm}^{-1}$ ,  $981.09\text{ cm}^{-1}$ , prema navedenom redosledu) u poređenju s referentnom cementnom pastom, što se može pripisati opadanju stepena polimerizacije C-S-H faze. Nakon 60 dana hidratacije primetno je pomeranje absorpcione trake vezane za Si-O valentine vibracije  $Q^2$  tetraedara C-S-H faza prema većim talasnim brojevima u poređenju s referentnom pastom. Ovo ukazuje na bolji stepen polimerizacije C-S-H strukture sa dodatkom zeolita i produženim vremenom hidratacije.

- Uzorci CZ20 i CZ30 starosti 60 dana imali su mnogo manju ukupnu poroznost u poređenju sa uzorcima C i CZ10. Uzorci CZ10, CZ20, CZ30 starosti 60 dana imali su manju ukupnu poroznost u poređenju sa uzorcima negovanim 28 dana. Kod svih uzoraka starosti 28 dana dominantne su mezopore. Kod uzoraka C i CZ10 i CZ30 starih 60 dana, dominantne su mezopore dok su za uzorak CZ20 dominantne makropore.

- Nakon 28 dana negovanja, vrednosti čvrstoća pri pritisku pokazuju da paste CZ10 i CZ20 imaju za 8.5% i 12.40%, respektivno, veće vrednosti čvrstoća pri pritisku u odnosu na referentnu pastu.

S porastom količine zeolita, čvrstoća pri pritisku uzoraka CZ20 i CZ30 starosti 60 dana, smanjena je u poređenju sa čvrstoćom referentne paste. Nasuprot tome, uzorak CZ10 jedini je koji je skoro dostigao čvrstoću referentnog uzorka.

## ZAHVALNOST

U radu je prikazan deo istraživanja koje je pomoglo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije u okviru tehnološkog projekta TR 36017 pod nazivom: „Istraživanje mogućnosti primene otpadnih i recikliranih materijala u betonskim kompozitima, sa ocenom uticaja na životnu sredinu, u cilju promocije održivog građevinarstva u Srbiji”.

increase of zeolite amount. Similar relation has been obtained for 60 days old samples. The extraframework cations and exchanged capacity have been held responsible for hindering portlandite dissolution.

- According to the performed FTIR analysis, it can be concluded that introduction of the zeolite phase in cement pastes has influenced composition and structure of the C-S-H phase during the process of hydration. The pastes with zeolite after 28 days of hydration have had the shift towards the lower wavenumber values for CZ10 and CZ20 pastes ( $974.05\text{ cm}^{-1}$ ,  $981.09\text{ cm}^{-1}$ , respectively) in comparison with the reference paste, which could be attributed to the decrease of polymerization level of the C-S-H phase. After 60 days of hydration, there has been the shifting of the absorption band related to the existence of the Si-O stretching vibrations of  $Q^2$  tetrahedra of the C-S-H phase towards the higher wavenumber values in comparison with the reference paste. This indicates better polymerization of the C-S-H structure with the addition of zeolite with prolonged hydration time.

- Samples CZ20 and CZ30 at the age of 60 days have had a significantly lower total porosity compared to C and CZ10 samples. Samples CZ10, CZ20, CZ30 at the age of 60 days have had lower total porosity compared to the samples cured for 28 days. For all 28 days old samples mesopores are dominant. For C, CZ10 and CZ30 60 days old samples mesopores are dominant, while for CZ20 macropores are dominant.

- After 28 days of curing, the results of compressive strength values have shown that pastes CZ10 and CZ20 by 8.5% and 12.40%, respectively, have had higher compressive strength than the reference sample.

With an increase of zeolite content, the compressive strength of paste samples CZ20 and CZ30 at the age of 60 days has been reduced compared to the strength of the reference paste. In contrast, the sample CZ10 has been the only one which has almost reached the compressive strength value of the reference sample.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The research work reported in this paper is a part of the investigation within the research project TR 36017 "Utilization of by-products and recycled waste materials in concrete composites in the scope of sustainable construction development in Serbia: investigation and environmental assessment of possible applications", supported by the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia. This support is gratefully acknowledged.

## 5 LITERATURA REFERENCES

- [1] Yilmaz, B. et al: Properties of zeolitic tuff (clinoptilolite) blended portland cement, *Building and Environment* 42, 2007, 3808–3815.
- [2] Jana D.: A new look to an old pozzolan: Clinoptilolite – A promising pozzolan in concrete, *Proceedings of the Twenty-ninth Conference on Cement Microscopy Quebec City, PQ, Canada, 2007*, 168–179.
- [3] Tatomirović T., Radeka M.: Zeolite as pozzolanic material, in *International symposium on researching and application of contemporary achievements in civil engineering in the field of materials and structures: Proceedings, XXVI Congress, DIMK, Vrnjačka Banja, 2014*, 215–224.
- [4] Ahmadi, B., Shekarchi, M.: Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material, *Cement & Concrete Composites* 32, 2010, 134–141.
- [5] Perraki, Th., Kakali, G., Kontoleon, F.: The effect of natural zeolites on the early hydration of Portland cement, *Microporous and Mesoporous Materials* 61, 2003, 205–212.
- [6] Lothenbach, B., Scrivener, K., Hooton, R.D.: Supplementary cementitious materials, *Cement and Concrete Research* 41, 2011, 1244–1256.
- [7] Richardson, I.G.: The calcium silicate hydrates, *Cement and Concrete Research* 38, 2008, 137–158.
- [8] Mertens, G., Snellings, R., Van Balen, K., Bicer-Simsir, B., Verlooy, P., Elsen, J.: Pozzolanic reactions of common natural zeolites with lime and parameters affecting their reactivity, *Cement and Concrete Research* 39, Issue 3, March 2009, 233–240.
- [9] S. Diamond: The microstructure of cement paste and concrete—a visual primer, *Cement and Concrete Composites* 26, 2004, 919–933.
- [10] Simić V. et al.: Zeolite deposits and occurrences in Serbia – an overview, *Zeolite 2014 – 9th International Conference on the Occurrence, Properties and Utilization of Natural Zeolites, Belgrade, Serbia, 2014*, 217–218.
- [11] Milović T., Radeka M., Malešev M., Radonjanin V.: Compressive strength and mineralogical properties of cement paste containing zeolite, *International conference contemporary achievements in civil engineering 2016*, 22. April 2016, Subotica, Serbia, 397–403.
- [12] Choudhary, H.K. et al.: Observation of phase transformations in cement during hydration. *Construction and Building Materials* 101, 2015, 122–129.
- [13] SRPS EN 196-1: Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength.
- [14] Radeka, M., Milović, T., Malešev, M., Radonjanin, V.: Effect of zeolite on basic physical properties, mechanical properties and frost resistance of cement mortars. *13th International Scientific Conference INDIS 2015*, 25–27 November 2015, Novi Sad, Serbia, 260–272.
- [15] Radeka, M., Malešev, M., Radonjanin, V., Tatomirović, T.: Pozzolanic activity of natural zeolite from one Serbian deposit, in *International symposium on researching and application of contemporary achievements in civil engineering in the field of materials and structures: Proceedings, XXVI Congress, DIMK, Vrnjačka Banja, 2014*, 191–201.
- [16] Yilmen, R., Jäglid, U., Steenari, B-M., Panas. I.: Early hydration and setting of Portland cement monitored by IR, SEM and Vicat techniques, *Cement and Concrete Research* 39, 2009, 433–439.
- [17] Mehta K., Monteiro P.: *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*, 3rd edition, McGraw-Hill, 2006, pp 52.
- [18] Aligizaki, K.K.: *Pore structure of cement-based materials- Testing, interpretation and requirements*, Taylor&Francis, New York, 2006, ISBN 0-419-22800-4.

## REZIME

### PROCES HIDRATACIJE I ČVRSTOĆA PRI PRITISKU CEMENTNIH PASTA KOJE SADRŽE PRIRODNI ZEOLIT

Miroslava RADEKA  
Tiana MILOVIĆ  
Mirjana MALEŠEV  
Vlastimir RADONJANIN  
Mirjana LABAN

U ovom radu prikazani su rezultati studije ispitivanja uticaja prirodnog zeolita iz Igroša, Srbija, na proces hidratacije i čvrstoću pri pritisku portland cementnih pastā, kod kojih je jedan deo cementa zamenjen prirodnim zeolitom. Eksperimentalni deo istraživanja sastojao se iz tri faze. U okviru prve faze dat je hemijski sastav prirodnog zeolita i ispitana su teksturalna svojstva prirodnog zeolita i portland cementa. U drugoj fazi, spravljani su uzorci portland cementnih pastā koji sadrže 0%, 10%, 20% i 30% prirodnog zeolita u odnosu na masu cementa, i negovani su 28 i 60 dana. Potom su ispitana mineraloška svojstva i čvrstoće pri pritisku pastā. Proučavani su i produkti hidratacije kao i relativne promene potrošnje portlandita u toku procesa hidratacije pomoću rendgenske strukturne analize i infracrvene spektroskopije s Furijeovom transformacijom. Dodatno je metodom živine porozimetrije urađena karakterizacija strukture pora.

**Ključne reči:** prirodni zeolit, cementna pasta, produkti hidratacije, XRD, FTIR, živina porozimetrija, čvrstoća pri pritisku

## SUMMARY

### HYDRATION PROCESS AND COMPRESSIVE STRENGTH OF CEMENT PASTES CONTAINING NATURAL ZEOLITE

Miroslava RADEKA  
Tiana MILOVIC  
Mirjana MALESEV  
Vlastimir RADONJANIN  
Mirjana LABAN

This paper presents the results of the study examining the effect of natural zeolite from Igroš, Serbia, on the hydration and compressive strength of Portland cement based pastes, in which a part of cement has been replaced by natural zeolite. The experimental part comprises three stages. In the first stage, the chemical composition of natural zeolite and the textural properties of both natural zeolite and Portland cement have been examined. In the second stage, Portland cement based pastes incorporating 0%, 10%, 20% and 30% per weight of natural zeolite have been prepared and cured for 28 and 60 days. Finally, mineralogical properties and compressive strength of pastes have been examined. The products of hydration and relative changes of portlandite consumption throughout hydration process (28 and 60 days) have been studied by the means of X-ray diffraction and Fourier transform infrared spectroscopy. Additionally, mercury intrusion porosimetry has been used to characterise pore structure.

**Key words:** natural zeolite, cement paste, hydration products, XRD, FTIR, mercury intrusion porosimetry, compressive strength

## UPUTSTVO AUTORIMA\*

### Prihvatanje radova i vrste priloga

U časopisu Građevinski materijali i konstrukcije štampaće se neobjavljeni radovi ili članci i konferencijska saopštenja sa određenim dopunama ili bez dopuna, prema odluci Redakcionog odbora, a samo izuzetno uz dozvolu prethodnog izdavača prihvatit će se i objavljeni rad. Vrste priloga autora i saradnika koji će se štampati su: originalni naučni radovi, prethodna saopštenja, pregledni radovi, stručni radovi, konferencijska saopštenja (radovi sa naučno-stručnih skupova), kao i ostali prilozi kao što su: prikazi objekata i iskustava - primeri, diskusije povodom objavljenih radova i pisma uredništvu, prikazi knjiga i zbornika radova, kao i obaveštenja o naučno-stručnim skupovima.

*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 kratko, jasno i objektivno, ali tako da poznavalac problema može proceniti rezultate eksperimentalnih ili teorijsko numeričkih analiza i tok razmišljanja, 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. U ovu kategoriju spadaju i diskusije o objavljenim radovima ako one sadrže naučne doprinose.

*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 pregledni 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. On sadrži i rezultate razvojnih istraživanja.

*Konferencijsko saopštenje* ili rad sopšten na naučno-stručnom skupu koji mogu biti objavljeni u izvornom obliku ili ih autor, u dogovoru sa redakcijom, bitno preradi i proširi. To mogu biti naučni radovi, naročito ako su sopštenja po pozivu Organizatora skupa ili sadrže originalne rezultate prvi put objavljene, pa ih je korisno uz određene dopune učiniti dostupnim široj stručnoj javnosti. Štampaće se i stručni radovi za koje Redakcioni odbor oceni da su od šireg interesa.

*Ostali prilozi* su prikazi objekata, tj. njihove konstrukcije i iskustava-primeri u građenju i primeni različitih materijala, diskusije povodom objavljenih radova i pisma uredništvu, prikazi knjiga i zbornika radova, kao i obaveštenja o naučno-stručnim skupovima.

Autori uz rukopis predlažu kategorizaciju članka. Svi radovi pre objavljivanja se recenziraju, a o prihvatanju za publikovanje o njihovoj kategoriji konačnu odluku donosi Redakcioni odbor.

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 zbog eventualnog oštećenja ili gubitka rukopisa.

**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.**

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.

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 telefone, faks i adresu elektronske pošte, a za ostale autore poštansku adresu.

Uz sažetak (rezime) od oko 150 do 200 reči, na srpskom i engleskom jeziku daju se ključne reči (do deset). 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-belom tehničkom, u formatu koji obezbeđuje da pri smanjenju na razmere za štampu, po širini jedan do dva stupca (8cm ili 16.5cm), a po visini najviše 24.5cm, ostanu jasni i čitljivi, tj. da veličine slova i brojeva budu najmanje 1.5mm. Originalni crteži treba da budu kvalitetni i u potpunosti pripremljeni za presnimavanje. Mogu biti i dobre, oštre i kontrastne fotokopije. Koristiti fotografije, u crno-belom tehničkom, na kvalitetnoj hartiji sa oštrim konturama, koje omogućuju jasnu reprodukciju. Skraćenice u prilogima koristiti samo izuzetno uz obaveznu legendu. Prilozi se posebno označavaju arapskim brojevima, prema redosledu navođenja u tekstu. Objašnjenje tabela daje se u tekstu.

Potrebno je dati spisak svih skraćenica korišćenih u tekstu.

U popisu literature na kraju rada daju se samo oni radovi koji se pominju u tekstu. Citirane radove treba prikazati po azbučnom 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 navesti 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 stranicapoglavlja 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...». Neobjavljeni članci mogu se pominjati u tekstu kao «usmeno saopštenje».

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 prilogima.

Za detaljnija tehnička uputstva za pripremu rukopisa autori se mogu obratiti Redakcionom odboru časopisa.

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 ili miram@uns.ac.rs i dimk@ptt.rs

Već sajt Društva i časopisa: www.dimk.rs

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



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**